Simulationsbasierte Absicherung der Ergonomie mit Hilfe digital beschriebener menschlicher Bewegungen

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von	**Dipl.-Wi.-Ing. Ricardo Schönherr geb. Jendrusch**
geboren am	11.12.1982 in Leipzig
eingereicht am	30.10.2013
Gutachter:	Prof. Dr. phil. habil. Dr. Ing. Birgit Spanner-Ulmer Prof. Dr. Ing. Egon Müller Doz. Dr. sc. techn. Wolfgang Leidholdt

Chemnitz, den 30.01.2014

Bibliographische Beschreibung

Schönherr, Ricardo

Simulationsbasierte Absicherung der Ergonomie mit Hilfe digital beschriebener menschlicher Bewegungen

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, Professur Arbeitswissenschaft, Chemnitz, 30. Oktober 2013

185 Seiten, 56 Abbildungen, 8 Tabellen, 243 Literaturquellen, 5 Anlagen

Referat

Digitale Menschmodelle gelten als gut geeignete Werkezeuge zur Planung und Bewertung manueller Arbeit, insbesondere zur präventiven Ergonomieabsicherung. Bislang ist jedoch der Funktionsumfang der Softwaretools unzureichend und der Bedienaufwand zu hoch. In der vorliegenden Arbeit wird daher die Entwicklung einer Methode zur Aufbereitung digital erfasster menschlicher Bewegungen für die Bewegungsgenerierung und semiautomatische Ergonomiebewertung beschrieben. Nach einer Diskussion des gegenwärtigen Wissensstandes folgt die Darstellung zweier empirischer Untersuchungen zur Bewegungserfassung und -auswertung. Anschließend wird die Implementierung eines mehrere Belastungsfaktoren umfassenden Kombinationsverfahrens zur Ergonomiebewertung erläutert. Die gewonnenen Erkenntnisse zur Bewegungsgenerierung und Ergonomiebewertung fließen in die Entwicklung einer Software zur Planung und Bewertung manueller Arbeit, den Editor menschlicher Arbeit (ema), ein. Schließlich erfolgt eine Evaluation anhand realer Planungsszenarien.

Schlagworte

Digitale Menschmodelle, Ergonomiebewertung, Arbeitswissenschaft, Belastung, EAWS, Bewegungserfassung, Motion Capturing, Bewegungssimulation, Bewegungsmodellierung

Abstract

Digital Human Models are said to be appropriate tools for planning and assessing human work; especially for preventive ergonomics risk assessment. Up to now, the functional range of established software tools is not sufficient and the operation is too complex and time consuming. Thus, in the present doctoral thesis, the development of a method for the preparation of digitally captured human motions for an algorithmic motion generation and automatic ergonomic risk assessment is described.

On the summarization of the relevant current level of knowledge follows the description of two empirical studies for motion capturing and analysis. Afterwards the implementation of a method of the ergonomics risk assessment that combines several biomechanical risk factors is explained.

The results of the preliminary studies flow into the development of a new software tool for planning and assessing human work – the editor for manual work activities (ema).

Finally, the practical evaluation with the help of real planning scenarios is presented.

Keywords

digital human models, ergonomics risk assessment, human factors, stress, EAWS, motion capturing, motion simulation, motion generation

Vorwort

Diese Arbeit entstand zu großen Teilen im Rahmen des vom Europäischen Fond für regionale Entwicklung (EFRE) und vom Freistaat Sachsen durch die Sächsische Aufbaubank (SAB) geförderten Verbundprojektes „System zur Bewegungssynthese für digitale Menschmodelle (eMAN)“. Ich bedanke mich bei allen Projektpartnern der Professuren Arbeitswissenschaft und Graphische Datenverarbeitung der Technischen Universität Chemnitz, des Instituts für Mechatronik e. V. sowie bei den Mitarbeitern der imk automotive GmbH. Gedankt sei ebenfalls den Mitarbeitern der Volkswagen AG, die durch Ihre Mitarbeit im Fachbeirat das Gelingen des Projekts unterstützten.

Meiner Doktormutter Frau Prof. Birgit Spanner-Ulmer danke ich herzlich für die bereitwillige und unkomplizierte Betreuung des Promotionsvorhabens.
Bei Herrn Prof. Müller bedanke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Besonderer Dank gilt Herrn Dr. Wolfgang Leidholdt und Herrn Dr. Jens Trepte, ohne sie hätte die Arbeit nie entstehen können. Sebastian Bauer danke ich für seine wunderbare Arbeit an ema. Für die gute Zusammenarbeit und die hilfreichen Diskussionen bedanke ich mich bei Dr. Lars Fritzsche.

Den Kollegen von Volkswagen und Audi danke ich für die Bereitstellung der Simulationen für die Validierung. Bei Nicole Neubert, Benjamin Illmann und Mario Walther möchte ich mich für die Unterstützung meiner Studie bedanken.

Den Studenten Philipp Geiler, Josefin Tilch, Matthias Unger, Anja Thiele und Roman Arnold, die mit ihren Arbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, danke ich ebenfalls ganz herzlich.

Zu guter Letzt danke ich meiner Frau, Dr. Petra Schönherr, die mich stets unterstützt und mir die notwendigen Freiräume zum Arbeiten lässt.

Inhaltsverzeichnis

Bibliographische Beschreibung 2
Abstract 3
Vorwort 4
Inhaltsverzeichnis 5
Abbildungsverzeichnis 9
Anlagenverzeichnis 11
Tabellenverzeichnis 12
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis 13
1 Einleitung 15
1.1 Motivation 15
1.2 Fragestellungen 16
1.3 Lösungsansatz und Aufbau der Arbeit 18
1.4 Das Verbundprojekt eMAN – System zur Bewegungssynthese für digitale Menschmodelle 19
2 Theoretischer Hintergrund 21
2.1 Menschliche Bewegungen 21
2.1.1 Grundlagen menschlicher Bewegungen 21
2.1.2 Physiologische Grundlagen 23
2.1.3 Physikalische Grundlagen 24
2.1.4 Bewegungsanalyse und -modellierung 27
2.1.5 Zusammenfassung 30
2.2 Strukturierungsmodelle menschlicher Arbeit und Bewegung 31
2.2.1 Strukturierung aus technologischer Sicht 31
2.2.2 Strukturierung aus arbeitsorganisatorischer Sicht 32
2.2.3 Strukturierung von Bewegungen aus tätigkeitsunabhängiger Sicht 34
2.2.4 Zusammenfassung 34
2.3 Arbeitsgestaltung und Ergonomie 35
2.3.1 Begriffsbestimmung 35
2.3.2 Dimensionen der Arbeitsgestaltung 36

2.3.3 Methoden der Ergonomiebewertung 38
2.3.4 Rechnerunterstützte Verfahren zur Ergonomiebewertung 40
2.3.5 Zusammenfassung 43
2.4 Digitale Menschmodelle 43
2.4.1 Die digitale Fabrik 43
2.4.2 Historische Entwicklung und wichtige Modelle 46
2.4.3 Funktionsumfang und Anwendungsgebiete 46
2.4.4 Bewegungsgenerierung für Digitale Menschmodelle 51
2.4.5 Zusammenfassung 51
2.5 Der Produkt-Entstehungs- und Herstellungsprozess 52
2.5.1 Begriffsbestimmung 52
2.5.2 Phasen des Produkt-Entstehungs-Prozesses 53
2.5.3 Ergonomie im Produkt-Entstehungs- und Herstellungsprozess 55
2.5.4 Zusammenfassung 57
2.6 Fazit 57
3 Methode zur Aufbereitung digital erfasster menschlicher Bewegung für die Bewegungsgenerierung 59
3.1 Hierarchisches Beschreibungsmodell zur Bewegungssynthese 60
3.1.1 Die komplexe technologische Verrichtung 61
3.1.2 Klassifizierung komplexer Verrichtungen 62
3.1.3 Hierarchisches Ebenenmodell der Verrichtungen und Bewegungen 64
3.1.4 Zusammenfassung 67
3.2 Vorüberlegungen zum Bewegungsstudium 67
3.2.1 Eingrenzung des Untersuchungsbereiches 69
3.2.2 Laborversuche 70
3.2.3 Bewegungserfassung 71
3.2.4 Zusammenfassung 71
3.3 Studie 1: Motion Capturing unter Laborbedingungen 72
3.3.1 Untersuchungsgegenstand 72
3.3.2 Stichprobe 72
3.3.3 Versuchsdesign 73
3.3.4 Ergebnisse 75

3.3.5 Zusammenfassung 80
3.4 Studie 2: Motion Capturing eines Facharbeiters 80
3.4.1 Untersuchungsgegenstand 80
3.4.2 Stichprobe 81
3.4.3 Versuchsdesign 81
3.4.4 Ergebnisse 84
3.4.5 Zusammenfassung 87
3.5 Entwicklung einer Methode zur Bewegungserfassung und -aufbereitung 87
3.5.1 Vorbereitung und Analyse 87
3.5.2 Digitale Erfassung 88
3.5.3 Aufbereitung und Prüfung 89
3.5.4 Anwendung zur Bewegungssynthese 90
3.5.5 Zusammenfassung 92
3.6 Ableitung idealtypischer Bewegungsmuster 92
3.6.1 Werkstückhandhabung 93
3.6.2 Werkzeughandhabung 96
3.6.3 Allgemeine Untersuchungskritik 97
3.6.4 Zusammenfassung 98
4 Anwendung einer Methode zur Ergonomiebewertung für digitale Menschmodelle 99
4.1 Auswahl einer Methode und Prüfung auf Umsetzbarkeit 99
4.1.1 Anforderungen und Auswahl einer Methode 99
4.1.2 Prototypische Umsetzung 103
4.1.3 Zusammenfassung 106
4.2 Umsetzung 106
4.2.1 EAWS Modul 1: Körperstellung 106
4.2.2 EAWS Modul 2: Aktionskräfte 110
4.2.3 EAWS Modul 3: Manuelles Handhaben von Lasten 112
4.2.4 EAWS Modul 0: Extrapunkte 115
4.2.5 EAWS Modul 4: Belastung der oberen Extremitäten 116
4.2.6 Zusammenfassung 117
5 Umsetzung der Ergebnisse und Praxisevaluation 118

5.1 Der Editor menschlicher Arbeit 118
5.1.1 Begriffsbestimmung 118
5.1.2 Funktionsprinzip 118
5.1.3 Zusammenfassung 121
5.2 Studie zur Praxisevaluation 121
5.2.1 Untersuchungsgegenstand 122
5.2.2 Vorbetrachtungen 122
5.2.3 Stichprobe 123
5.2.4 Untersuchungsdesign 123
5.2.5 Ergebnisse 124
5.2.6 Zusammenfassung 128
5.3 Praxiseinsatz digitaler Mensch-Simulationen 129
5.3.1 Anforderungsermittlung 129
5.3.2 Anwendungsfälle und Vorgehensweise 130
5.3.3 Zusammenfassung 132
6 Zusammenfassung und Ausblick 133
6.1 Zusammenfassung 133
6.2 Ausblick 135
Literatur 137
Anlagen 155
Anlage 1: Dokumentation zur Motion Capturing-Studie 1 155
Anlage 2: Dokumentation zur Motion Capturing-Studie 2 169
Anlage 3: Software „Ergo-Tool“ 175
Anlage 4: Bewertungsbogen EAWS 176
Anlage 5: Fragebogen zur Evaluationsstudie 180
Lebenslauf 184

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Alternative Gelenkkonfigurationen eines Industrieroboters 25
Abbildung 2 - Kinematisches Modell des menschlichen Arms.....27
Abbildung 3 - Arbeitssystemmodell nach Bubb 36
Abbildung 4 - Dreistufige Einteilung der Ergonomiebewertungsverfahren 38
Abbildung 5 - Mixed Reality Szenario einer Fahrzeugmontage-Situation.....42
Abbildung 6 - Das Y-CIM-Modell 44
Abbildung 7 - Nutzenpotentiale der Digitalen Fabrik 45
Abbildung 8 - Aufbau und Darstellungsmöglichkeiten digitaler Menschmodelle am Beispiel des Modells Jack 47
Abbildung 9 - Funktionsschema digitaler Menschmodelle.....48
Abbildung 10 - Analysefunktionen für das digitale Menschmodell Human Builder 49
Abbildung 11 - Manipulationsfunktionen digitaler Menschmodelle 50
Abbildung 12 - Analysefunktionen digitaler Menschmodelle 50
Abbildung 13 - Phasenmodell des Produkt-Entstehungs-Prozesses.....53
Abbildung 14 - Möglichkeit der Kostenbeeinflussung und Kostenfestlegung während des Produktlebenslaufs.....54
Abbildung 15 - Notwendige Arbeitsschritte zur Simulation einer Arbeitsaufgabe 60
Abbildung 16 - Virtuelle Szene »Setzen Schweißnaht an Teil auf Tisch« 61
Abbildung 17 - Grundbewegungen eines digitalen Menschmodells 65
Abbildung 18 - Verrichtungshierarchie mit 4 Ebenen 66
Abbildung 19 - Anforderungen an generierte Bewegungen.....68
Abbildung 20 - Laborversuche zum Entnehmen eines Objektes aus einem Ladungsträger erhöht (1) und am Boden (2).....70
Abbildung 21 - Funktionsprinzip des Motion Capturing Systems A.R.T. 71
Abbildung 22 - Probanden Motion Capture Studie 1 mit Markern der Firma A.R.T. ..73
Abbildung 23 - Versuchsaufbau Motion Capture Studie 1 73
Abbildung 24 - Schematische Darstellung der Übertragung der 17 Targets auf das digitale Menschmodell.....74
Abbildung 25 - Auswirkung des Lastgewichtes auf die Körperhaltung beim Aufnehmen der Last.....76
Abbildung 26 - Ausgewählte Einzelbilder zur Darstellung des Ablaufs der Verrichtung "Handhabung Akkuschrauber" 76
Abbildung 27 - Graphische Darstellung des Gelenkverlaufs am Beispiel des rechten Ellbogens während der Verrichtung "Handhabung Akkuschrauber" 77
Abbildung 28 - Vergleichende graphische Darstellung der Gelenkverläufe der drei Probanden für die Verrichtung "Handhabung Akkuschrauber": 78
Abbildung 29 - Ausrichtung der drei Probanden zum Wirkpunkt während der "Handhabung Akkuschrauber" 79

Abbildung 30 - Demonstrator zur Bewegungssynthese, Beispiel "Handhabung Akkuschrauber" 80
Abbildung 31 - Probekörper zur Untersuchung der Werkzeugapplikation 82
Abbildung 32 - Mögliche Umschlagzonen bei der Handhabung von motorisch angetriebenen (links) und manuell betätigten Werkzeugen (rechts) 83
Abbildung 33 - Umschlagzonen für die Verrichtung „Handhabung Akkuschrauber" .. 84
Abbildung 34 - Phasen der Verrichtung „Handhabung Eindrückwerkzeug“ 85
Abbildung 35 - Gelenkwinkelverläufe während der Phasen der Verrichtung „Handhabung Eindrückwerkzeug“ 86
Abbildung 36 - Schema der Bewegungsgenerierung 91
Abbildung 37 - Methode zur Systembefüllung: Phasen und Inhalt 92
Abbildung 38 - Greiffolge für den Objekttyp „Streifenplatte" 95
Abbildung 39 - Werkzeugmodell mit Greifpunkt (1) und Arbeitspunkt (2) 97
Abbildung 40 - Prototypische Visualisierung kombinierter Zeit- und Ergonomieanalysen 104
Abbildung 41 - Prototypische AAWS-Bewertung für das Menschmodell Human Builder 105
Abbildung 42 - Möglichkeiten der Rumpfbeugung für das Menschmodell Human Builder 108
Abbildung 43 - Höhen der Körperteilmarker im Zeitverlauf 109
Abbildung 44 - Tabellarische Darstellung der Körperhaltungszwischenwerte im System ema 110
Abbildung 45 - ema-Eingabedialog für Verrichtungsparameter einschließlich Kraftaufwand 111
Abbildung 46 - Attribute eines digitalen Modells im System CATIA 113
Abbildung 47 - ema-Eingabedialog für das Ziehen und Schieben 115
Abbildung 48 - ema-Eingabedialog für Extrapunkte 116
Abbildung 49 - Verrichtungsbibliothek des ema 119
Abbildung 50 - 3D-Szene einer digitalen Menschsimulation 120
Abbildung 51 - ema-Benutzeroberfläche 120
Abbildung 52 - Fragebogen zur Evaluationsstudie (Auszug) 124
Abbildung 53 - Gegenüberstellung der EAWS-Bewertungen der drei Beobachter und von ema 126
Abbildung 54 - Geringfügige Rumpfdrehung in einem Beispielszenario 127
Abbildung 55 - Menschmodell ema: mittlere Rumpfdrehung von 15° bei aufrechter Körperhaltung 128
Abbildung 56 - Einsatzgebiete digitaler Menschmodellierung im Produkt-Entstehungs- und Herstellungsprozess 131

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Dokumentation zur Motion Capturing-Studie 1 155
Anlage 2: Dokumentation zur Motion Capturing-Studie 2 169
Anlage 3: Software „Ergo-Tool“ 175
Anlage 4: Bewertungsbogen EAWS 176
Anlage 5: Fragebogen zur Evaluationsstudie 180

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Zeitartengliederung nach REFA 32
Tabelle 2 - Gegenüberstellung der Strukturierungsmodelle von REFA und MTM 33
Tabelle 3 - Hierarchische Strukturierung von Schraubarbeiten 62
Tabelle 4 - Ebenen der Verrichtungshierarchie im Vergleich zu den Strukturierungsmodellen von REFA und MTM 67
Tabelle 5 - Vergleich praxisüblicher Ergonomiewerkzeuge hinsichtlich des Funktionsumfangs und der Anwendbarkeit 101
Tabelle 6 - Körperhaltungsklassen für das Modul Lastenhandhabung 114
Tabelle 7 - Einschätzung der Beobachter zur Natürlichkeit der simulierten Körperhaltungen 125
Tabelle 8 - Rangkorrelationen der EAWS Risikobewertung zwischen den Beobachtern und ema 126

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

κ	Cohens Kappa
p	Signifikanzwert
$\vec{r}$	Ortsvektor
r_k	Intraklassen-Korrelation
τ	Kendalls Tau
$\tilde{x}$	Median
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AAWS	Automotive Assembly Worksheet
A.R.T.	Advanced Realtime Tracking
BkA	Bewertung körperlicher Arbeit
BkB	Bewertung körperlicher Belastungen
BSVS	Burandt/Schultetus/VDI/Siemens
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAP	Computer Aided Planning
CAQ	Computer Aided Quality
CIM	Computer Integrated Manufacturing
DC	DesignCheck
DIN	Deutsches Institut für Normung
EAWS	European Assembly Worksheet
EEG	Elektroenzephalografie
ema	Editor menschlicher Arbeit
EMG	Elektromyografie
EN	Europäische Norm
EOP	End of Production
FMEA	Fehler-Möglichkeits-Einfluss-Analysen
HHT	Heben/Halten/Tragen
HMD	Head-Mounted-Displays
IAD	Institut für Arbeitswissenschaft
IE	Industrial Engineering
KVP	Kontinuierliche Verbesserungsprozess
LMM	Leitmerkmalmethode
MoCap	Motion Capturing
MP	Manuelle Prozesse
MR	Mixed Reality
MTM	Methods Time Measurement
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health

NPW	New Production Worksheet
OCRA	Occupational Risk Assessment
OWAS	Ovako Working Posture Analysing System
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PDM	Produktdatenmanagement-Systeme
PEP	Produkt-Entstehungs-Prozesses
PLM	Produkt-Lebenszyklus-Management
POI	Point(s) of Interest
PPS	Produktions-Planung und Steuerung
REFA	Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung (heute: REFA-Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung e. V.)
RULA	Rapid Upper Limb Assessment
SAM	Sequence-based activity and method analysis
SAK	System zur Analyse von Körperhaltungen
SOP	Start of Production
SvZ	System(e) vorbestimmter Zeiten
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VR	Virtual Reality
ZS	Ziehen/Schieben

1 Einleitung

1.1 Motivation

Unternehmen sehen sich heute mit einem turbulenten Geschäftsumfeld konfrontiert (Grundig, 2009; Wiendahl, Reichardt, & Nyhuis, 2009). Effekte wie die Globalisierung und die Wandlung hin zu einem Käufermarkt führen zu verkürzten Innovationszyklen, Produktdiversifikation und verringerten Losgrößen (Reinhart & Zäh, 2003; Westkämper & Zahn, 2009). Daraus ergibt sich die Notwendigkeit hochflexibler Herstellungsmöglichkeiten bei möglichst geringen Durchlaufzeiten (Schenk & Wirth, 2004; Arndt, 2008; Pawellek, 2008). Dies bedingt die Verfügbarkeit der dafür notwendigen Ressourcen, einschließlich einer gesunden und leistungsfähigen Belegschaft. Besonders im produzierenden Gewerbe sind jedoch die Belastungen an Arbeitsplätzen trotz stetiger Verbesserungen hoch (Streb, Voelpel, & Leibold, 2008). Gerade Montagearbeitsplätze sind geprägt durch eine hohe Standardisierung, zumeist kurze Arbeitstakte und hohe Wiederholfrequenzen (Jürgens, U., 2007). Arbeitsbedingte Erkrankungen sind die Folge. Allein Muskel- und Skeletterkrankungen führen jährlich zu erheblichen Ausfällen. Im Jahr 2010 waren sie die Ursache von 95,4 Millionen Arbeitsunfähigkeitstagen. Damit waren sie die häufigste Ursache für krankheitsbedingte Fehlzeiten von Arbeitskräften und führten zu einem Ausfall an Bruttowertschöpfung in Höhe von 16 Milliarden Euro (Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS), 2012).

Die derzeitige demographische Entwicklung führt zu einem Anstieg des Durchschnittsalters der Gesamt- wie auch Arbeitsbevölkerung (Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2011; Ilmarinen, 2006). Erkrankungen, insbesondere des Muskel- und Skelettsystems, treten mit zunehmendem Alter wesentlich häufiger auf (Zoike, et al., 2011), woraus sich ein künftiger Anstieg der Arbeitsunfähigkeit prognostizieren lässt. Um konstante Produktionsleistungen zu gewährleisten sind jedoch niedrige Krankenstände ein wichtiges Gestaltungsziel der betrieblichen Planung. Gerade für Branchen wie die Automobilindustrie, wo zumeist kurze Taktzeiten und hohe Auslastung, regelmäßige Wechselschichtarbeit und geringe Handlungsspielräume eine Belastungskompensation weitgehend behindern, bedarf es folglich Lösungsansätzen, diesen geänderten Anforderungen zu begegnen.

Aus dem demographischen Wandel folgt auch ein weiterer Aspekt, nämlich ein potentieller Mangel an Fachkräften, weshalb es künftig einen Wettbewerb der Unternehmen um qualifizierte Mitarbeiter geben wird (Reinberg & Hummel, 2003; Dietz & Walwei, 2007). Gute Arbeitsbedingungen stellen somit auch einen Wettbewerbsfaktor im Hinblick auf die Personalrekrutierung dar. Ergonomische, d. h. belastungsarme Arbeitsgestaltung wirkt sich nachweislich positiv auf die Gesundheit der Mitarbeiter (Cole, Ibrahim, Shannon, Scott, & Eyles, 2001; Yeung, Genaidy, Deddens, Shoaf, & Leung, 2003), aber auch auf weitere Faktoren wie Qualität (Eklund, 1997; Lin, Drury, & Kim, 2001; Bauer, Kittel, & Paulus, 2004; Fritzsche,

2010) und letztlich Wirtschaftlichkeit (Beevis & Slade, 2003; Hendrick, 2003) aus. Demzufolge werden ergonomisch gestaltete Arbeitsplätze sowohl zur Gesunderhaltung der Mitarbeiter als auch zur Produktivitätsverbesserung sowie zur Personalrekrutierung benötigt.

Für die Automobilindustrie typisch ist eine mehrjährige Latenzphase zwischen der Gestaltung der Produkte und deren späterer Herstellung, weshalb Belastungen, welche bereits durch das Produktdesign hervorgerufen werden, durch arbeitsgestalterische Maßnahmen später nur schwer kompensiert werden können (Luczak, 1991). Daher ist es notwendig, möglichst frühzeitig im Entwicklungs- und Planungsprozess tätig zu werden, um mit vergleichsweise geringem Aufwand einen hohen Nutzen zu erzielen (Ehrlenspiel, Kiewert, & Lindemann, 1998). Um eine durchgängige Berücksichtigung ergonomischer Belange, beginnend in frühen Phasen und sich fortsetzend bis in den Serienbetrieb hinein, zu realisieren, sind geeignete Analysemethoden und darüber hinaus auch zugehörige Prozessbeschreibungen zu entwickeln (Kugler, et al., 2009). Es gilt, einerseits die Qualität der Ergonomiebewertung zu erhöhen und andererseits den notwendigen Aufwand dafür zu verringern. Außerdem müssen Belastungsprognosen möglichst früh erfolgen, um etwaige Konzeptänderungen noch realisieren zu können. Ein Hilfsmittel zur präventiven ergonomischen Arbeitsgestaltung sind digitale Menschmodelle. Mit ihnen können Gestaltungsvarianten gefahrlos untersucht und verglichen sowie Belastungsprognosen erstellt werden (Landau, 2007). Jedoch sind die bislang etablierten Softwarelösungen hinsichtlich des notwendigen Zeitaufwandes zur Bewegungssimulation wie auch in Bezug auf die Möglichkeiten zur Auswertung für den Praxiseinsatz unzureichend.

1.2 Fragestellungen

Der Einsatz von Software-Werkzeugen im Produkt-Entstehungs- und Herstellungsprozess ist gängige Praxis, gerade die unter dem Begriff Digitale Fabrik zusammengefassten Systeme ermöglichen ein konsequentes Produkt-Lebenszyklus-Management (PLM). Die durchgängige Verfügbarkeit aller Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten bietet zu jedem Reifegrad vielseitige Untersuchungsmöglichkeiten, etwa zur Produktgestaltung, Materialflussoptimierung oder Robotersimulation (Sendler, 2009; Bracht, Geckler, & Wenzel, 2011). Die Betrachtung arbeitswissenschaftlicher Fragestellungen erfolgt mit Hilfe digitaler Menschmodelle. Deren Akzeptanz hängt wesentlich davon ab, ob der Aufwand zur Modellierung vertretbar und der Funktionsumfang ausreichend ist, um eine Anwendung in der frühzeitigen Planungsabsicherung zu ermöglichen (Chaffin, 2005; Zülch, 2009). Die erzeugten Bewegungen müssen humanmotorisch korrekt sein, d. h. sie müssen so ablaufen, wie sie ein Mensch üblicherweise ausführt – in der Arbeitswelt ist dies die Arbeitsweise eines geübten und eingearbeiteten Facharbeiters. Bei zurzeit am Markt

erhältlichen Software-Lösungen ist dieser Aufwand sehr hoch, weshalb digitale Menschsimulationen bislang nicht durchgängig angewandt werden (Fraunhofer IAO, 2007; Jendrusch, 2008).
Im Rahmen einer Befragung unter Anwendern digitaler Menschmodelle in Deutschland ergab sich, dass bzgl. der Manipulations-Funktionen der größte Bedarf an Verbesserung die Animation des Modells betrifft (Spanner-Ulmer & Mühlstedt, 2010). Die exakte Simulation der menschlichen Haltungen und Bewegungen sollte dabei nach Wunsch vieler Anwender auf Basis einer knappen und prägnanten Aufgabenbeschreibung erfolgen (Park, 2003).

Eine erste Fragestellung ist folglich:
Wie lassen sich mit möglichst geringem Aufwand humanmotorisch richtige Bewegungen mit einem digitalen Menschmodell simulieren?
Gerade die Anforderung, Bewegungssimulationen schnell und einfach erstellen zu können, ist von großer Praxisrelevanz. Durch Simulationen können Arbeitsabläufe besonders früh im Planungsprozess, noch vor der Realisierung von physischen Prototypen und der Umsetzung des Fertigungssystems, untersucht und optimiert werden. Somit kann tatsächlich eine konzeptive Arbeitsgestaltung sichergestellt werden, wohingegen Ergonomiemaßnahmen bislang zumeist korrektiv erfolgen, also nach der Fertigstellung des Arbeitssystems.

Ferner gilt es, auch den Umfang an Analysemethoden den Ansprüchen der Praxis entsprechend zu erweitern. Die derzeit erhältlichen Programme beinhalten neben der bloßen Visualisierungsfunktion zumeist einfache Methoden der Belastungsprognose, etwa für Körperhaltungen oder manuelle Lastenhandhabungen (Mühlstedt & Spanner-Ulmer, 2009). Betrachtungen über die Gesamtbelastung im Zeitverlauf sowie die Kombination unterschiedlicher Belastungsfaktoren sind nur bedingt möglich. Gerade in der Automobilindustrie wird jedoch vermehrt mit ganzheitlichen, d. h. mehrere Belastungsfaktoren kombinierenden Bewertungsinstrumentarien gearbeitet. Dieses Defizit bestätigt auch die Sicht der Anwender, welche sich Verbesserungen insbesondere im Hinblick auf Funktionen zur Analyse von Körperhaltungen, Lasten und Kräften wünschen (Spanner-Ulmer & Mühlstedt, 2010).

Eine zweite Fragestellung ist daher:
Wie lässt sich ein ganzheitliches Ergonomie-Bewertungssystem zur automatischen Auswertung digitaler Menschsimulationen realisieren?
Diese zweite Anforderung ist entscheidend für die Akzeptanz der Menschsimulation als Werkzeug zur Ergonomieabsicherung. Der Einsatz neuer Technologien soll Arbeitsabläufe beschleunigen, nicht aber bestehende Methoden und Prozesse behindern oder erschweren. Liefert ein Simulationswerkzeug die

Planungsergebnisse nicht in der vom Anwender gewünschten Form, besteht folglich die Gefahr, dass das Werkzeug abgelehnt wird. Im Laufe des Produkt-Entstehungs-Prozesses werden außerdem nicht ausschließlich Simulationen angewandt, vielmehr werden Ergonomiebewertungen auch mittels anderer Softwaretools oder in Papierform angefertigt. Dabei ist wichtig, dass dennoch durchgängig dieselben Methoden zum Einsatz kommen, damit die Vergleichbarkeit gesichert ist.
Sofern nun derart verbesserte Programme zur Simulation zur Verfügung stehen, ergeben sich neuartige Anwendungs-Szenarien im Hinblick auf die von den verfügbaren Daten abhängige Detaillierung einerseits und bezogen auf den Zeitpunkt im Produkt-Entstehungs- und Herstellungsprozess andererseits. Um die zum jeweiligen Zeitpunkt geeignetsten Werkzeuge und Methoden anzuwenden, gilt es, entsprechende Prozessbeschreibungen unter Berücksichtigung digitaler Menschsimulationen zu entwickeln.

1.3 Lösungsansatz und Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist linear gegliedert, jedes Kapitel baut auf Erkenntnissen der vorangegangenen auf, wobei die drei zentralen Fragestellungen nacheinander betrachtet werden.
Nach dem einleitenden Kapitel 1 werden in Kapitel 2 zunächst im theoretischen Hintergrund der Stand der Forschung, aktuell verfügbare Technologien sowie deren praktische Anwendung diskutiert. Durch die Interdisziplinarität der Arbeitswissenschaft werden hierbei auch Erkenntnisse anderer Fachgebiete, etwa der Physik oder Medizin berücksichtigt. Die Praxisorientierung der Arbeitswissenschaft kommt durch die strukturierte Betrachtung des Produkt-Entstehungsprozesses in der Industrie zum Ausdruck.
Kapitel 3 bezieht sich auf die erste Forschungsfrage. Hier wird eine Methode zur Aufbereitung digital erfasster menschlicher Bewegung für die Bewegungsgenerierung entwickelt. Zur Erstellung plausibler und realistischer Bewegungssimulationen wird auf echte menschliche Bewegungen, welche im Rahmen zweier empirischer Untersuchungen aufgenommen wurden, zurückgegriffen. Die erfassten Bewegungsdaten werden aufbereitet und exemplarisch zur Ableitung mathematischer Funktionen und Algorithmen genutzt, die die Voraussetzung schaffen, Bewegungen anhand weniger Parameter zu generieren.
Aufbauend auf den vorangegangenen Erkenntnissen behandelt Kapitel 4 die zweite Forschungsfrage. Es wird ein Ansatz zur semiautomatischen Ergonomiebewertung vorgestellt, welcher es ermöglicht, mit wenigen manuell ergänzten Informationen, digitale Menschsimulationen mit einem ganzheitlichen, also mehrere Belastungsfaktoren umfassenden Verfahren ergonomisch zu bewerten.

Die Erkenntnisse der vorangegangenen Kapitel wurden in ein Softwaretool zur Bewegungssynthese für ein digitales Menschmodell überführt, welches in Kapitel 5 vorgestellt und im Rahmen von Praxistests pilotiert wird.
Das abschließende Kapitel 6 enthält eine Zusammenfassung sowie den Ausblick auf weiterführende Forschungsansätze.

1.4 Das Verbundprojekt eMAN – System zur Bewegungssynthese für digitale Menschmodelle

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen der Entwicklung des Softwarewerkzeuges Editor menschlicher Arbeit (ema), einer Software zur Planung und Visualisierung manueller Tätigkeiten im Kontext der digitalen Fabrik. Die grundlegende Anforderung des Produkts zielt auf eben jene im vorangegangenen Kapitel 1.2 aufgezeigten Anforderungen, nämlich die rasche Möglichkeit der Simulationserstellung mit einem digitalen Menschmodell sowie die anschließende Auswertung im Hinblick auf ergonomische Risiken.
Zur Klärung der wissenschaftlichen Grundlagen wurde das vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und mit Mitteln des Freistaates Sachsen geförderte Verbundprojekt eMAN – System zur Bewegungssynthese für digitale Menschmodelle von der imk automotive GmbH initiiert, welche die Software entwickelt. Ziele des Projektes waren:

- Klärung der wissenschaftlichen Grundlagen zur Generierung ergonomisch- und biomechanisch korrekter Bewegungen für digitale Menschmodelle auf Grundlage von hoch aggregierten Tätigkeitsbeschreibungen (Verrichtungen),
- Erforschung einer Methode zur dynamischen Ergonomiebewertung komplexer Abläufe und
- Aufbereitung der Erkenntnisse zur nachfolgenden Implementierung in ein Produkt, welches eine völlig neue Qualität und Effizienz in der Planung und Visualisierung menschlicher Tätigkeiten zum Zwecke der Produkt- und Prozessoptimierung erreichen wird.

Die vier Partner des Projektes eMAN und ihre Aufgaben waren:

Professur Graphische Datenverarbeitung und Visualisierung der Technischen Universität Chemnitz. Ihre Aufgabe bestand in der Entwicklung eines Bewegungsgenerators für humanmotorisch richtige und biomechanisch vorbetrachtete Bewegungsabläufe technologischer Verrichtungen. Dabei wurden Verfahren zur Bewegungsgenerierung durch Bewegungssynthese wie auch für eine datenbankbasierte Bewegungsgenerierung untersucht und eine Testumgebung zur Verifizierung der Ergebnisse entwickelt.

Institut für Mechatronik e.V., An-Institut der Technischen Universität Chemnitz. Der Beitrag umfasste biomechanische Betrachtungen von Bewegungen sowie die technologische Umsetzung der Bewegungserfassung. Dies beinhaltete die Konzeption, Bewertung und Auswahl von Motion Capture Systemen und anschließend die Methodenbereitstellung zur Bewegungsanalyse und Identifikation von Bewegungsmustern.

Professur Arbeitswissenschaft der Technischen Universität Chemnitz. Anhand digitaler Bewegungsbeschreibungen wurde ein neues arbeitswissenschaftliches Bewertungsmodell für muskuläre Beanspruchungen entwickelt. Hierfür wurde ein Versuchstand entwickelt und anhand von Laboruntersuchungen ein Algorithmus zur Definition dynamischer Muskelarbeit einschließlich eines Arbeits-Belastungs-Index‘ konzipiert.

imk automotive GmbH: Ihr oblag die Projektleitung und -koordination, die Spezifizierung einer Schnittstelle zur Übergabe geometriebezogener Daten an den Bewegungsgenerator, die Identifizierung, Auswahl und Klassifizierung von typischen menschlichen Bewegungen im Kontext von Montage- und Rohbauprozessen in der Automobilindustrie, der Entwurf eines hierarchischen Systems von Bewegungsebenen zur Gliederung und späteren Neukombination von Teilbewegungen sowie anschließend der Entwurf eines Systems zur Abbildung von handlungsbezogenen auf geometriebezogene Bewegungsdaten.

Zur Unterstützung des Projekts wurde ein Fachbeirat etabliert, ihm gehörten neben den Projektmitarbeitern der Partnerinstitute auch Experten der Volkswagen AG sowie der Deutschen MTM Vereinigung an. Damit sollte sichergestellt werden, dass die Richtung und die Ergebnisse der Forschung den späteren Anforderungen beim Einsatz in der Praxis gerecht werden und nachträglicher Aufwand für Anpassungs- bzw. Customizing-Anforderungen vermieden werden kann.

Die Laufzeit des Projektes erstreckte sich über zwölf Monate vom 01.04.2009 bis zum 31.03.2010.

2 Theoretischer Hintergrund

Dieses Kapitel dient der Darstellung des gegenwärtigen Wissensstandes der für die vorliegende Arbeit wesentlichen Aspekte. Dabei werden gemäß der zu klärenden Fragestellungen zunächst physiologische und physikalische Grundlagen menschlicher Bewegungen sowie Methoden zur Bewegungsanalyse thematisiert. Anschließend werden arbeitsplanerische Modelle zur Strukturierung von Arbeitsinhalten diskutiert sowie Konzepte und Werkzeuge für die Beurteilung menschlicher Arbeit erläutert. Dem schließt sich eine Überblicksdarstellung digitaler Menschmodelle und ihrer Funktionen an. Abschließend erfolgt eine Betrachtung des Produkt-Entstehungs- und Herstellungsprozesses, insbesondere des in der Automobilindustrie üblichen Phasenmodells, welches die Grundlage zur Integration digitaler Menschmodellierung in ein durchgängiges Konzept zur Absicherung der Ergonomie darstellt.

2.1 Menschliche Bewegungen

2.1.1 Grundlagen menschlicher Bewegungen

„Bewegen“ ist ein scheinbar selbstverständlicher Vorgang. Wie schwierig und komplex er tatsächlich ist, zeigt sich bei Kleinkindern, die gerade das Laufen erlernen. Es muss das Zusammenwirken zahlreicher Muskeln zeitlich koordiniert werden, um einerseits die notwendigen Kräfte für den Vortrieb zu erzeugen, andererseits wird durch Ausgleichsbewegungen der Arme und Aktivierung der Rumpfmuskulatur die notwendige Gleichgewichtserhaltung realisiert.

Im physikalischen Sinne wird Bewegung definiert als Ortsveränderung eines Körpers relativ zu anderen Körpern bzw. zu einem Bezugssystem (Zeitler & Simon, 1998). Für den Menschen bedeutet dies folglich ein Übergang von einer Körperstellung/Pose in eine andere. Körperstellungen beschreiben die räumliche Beziehung einzelner Körpergliedmaßen zueinander (Landau, 2007).

Historisch betrachtet wurden Bewegungen bereits von den altgriechischen Philosophen studiert, heute werden sie interdisziplinär, unter anderem innerhalb der Medizin, Psychologie, Biomechanik oder Sportwissenschaft untersucht (Mechling, 2003).

Bewegungen lassen sich im Hinblick auf ihren Zweck gliedern in (Gumpert, 2012):

- Alltagsbewegungen, d. h. weitgehend automatisierte Bewegungen, z. B. Laufen,
- Arbeitsbewegungen, also spezielle Bewegungsmuster, die einem Arbeitsprozess dienen,
- Sportbewegungen, welche durch gezielte Beanspruchung geprägt sind sowie
- Ausdrucksbewegungen, die in Form von Mimik und Gestik der Kommunikation oder künstlerischen Aspekten dienen.

Dabei kann unterschieden werden zwischen dem Außenaspekt der Bewegung, welcher die Raum-zeitliche Veränderung des Körpers betrifft, und dem Innenaspekt, der die inneren Steuerungs- und Funktionsprozesse umfasst. Der Begriff Bewegung beschreibt primär den Außenaspekt, für eine ganzheitliche Betrachtung wird der Begriff Motorik verwendet (Willimczik & Roth, 1983). Der Außenaspekt ist die Bewegungsdimension, welche durch qualitative Merkmale, wie Rhythmus oder Genauigkeit, und quantitative Merkmale, wie Geschwindigkeit oder Kraft, beschrieben wird. Der Innenaspekt umfasst die Handlungsdimension der Bewegung, deren Ursachen sensorische und psychische Fähigkeiten sowie subjektive Motive und Ziele sind (Loosch, 1999).
Bewegungen können sowohl bewusst als auch unbewusst (Reflexe) erfolgen. Selbst bei bewussten Bewegungen bedenkt der Mensch lediglich das Ziel, nicht aber den Vorgang selbst, welcher aus der Absicht heraus über Nerven letztlich Muskeln ansteuert, um die notwendigen Körpersegmente zu bewegen.
Bewegungshandlungen umfassen in aufeinanderfolgenden Phasen emotionale, kognitive sowie sensomotorische Prozesse und sind abhängig von den individuellen Eigenschaften (Roth & Willimczik, 1999). Nitsch (1986) geht von einer triadischen Struktur aus, welche die drei Phasen Antizipieren, Realisieren und Interpretieren umfasst. Das Rubikon-Modell (Heckhausen & Heckhausen, 2010), ein motivations-psychologisches Modell zu Handlungsphasen, umfasst noch eine weitere Phase und besteht aus den folgenden vier konsekutiven Abschnitten einer (Bewegungs-)Handlung:

- Prädezisionale Motivationsphase (Abwägen),
- Präaktionale Volitionsphase (Planen),
- Aktionale Volitionsphase (Handeln) und
- Postaktionale Motivationsphase (Bewerten).

Demzufolge geht einer Bewegung eine aktives Entscheiden bzw. Auswählen bzgl. der Bewegungsausführung voraus, d. h. der Mensch entscheidet auf Basis der situativen Gegebenheiten und der Einschätzung seiner Fähigkeiten und Fertigkeiten, wie die konkrete Bewegung ausgeführt werden soll. Nachträglich folgt eine Bewertung hinsichtlich Effektivität und Effizienz der gewählten Bewegungsstrategie. Daraus lässt sich ableiten, dass Bewegungsmuster sowohl von den individuellen Eigenschaften als auch von der Erfahrung und dem Training hinsichtlich der Bewegungen abhängen.

Die folgenden Kapitel fokussieren auf den Außenaspekt der Bewegungshandlungen. Es soll untersucht werden, wie die menschliche Motorik funktioniert und letztlich prognostiziert werden kann. Dies bedingt Kenntnisse sowohl der Physiologie des Menschen als auch der physikalischen Grundlagen der Bewegung.

2.1.2 Physiologische Grundlagen

Ein grundlegendes Verständnis der komplexen Physiologie des Menschen ist eine wesentliche Voraussetzung zur Analyse und Modellierung menschlicher Bewegungen. Dabei bildet das Muskel- und Skelettsystem die Grundlage der Bewegungsmöglichkeiten, wobei individuelle Körpereigenschaften das Bewegungsverhalten beeinflussen. Die arbeitswissenschaftliche Forschung beschreibt außerdem Bewegungen, welche in Folge der arbeitsbedingten Repetition als gesundheitsschädlich erachtet werden. Diese physiologischen Aspekte sind bei der Simulation menschlicher Bewegungen zu berücksichtigen.

Der menschliche Bewegungsapparat umfasst sowohl passive (Knochen, Gelenke, Bänder) als auch aktive (Muskeln) Elemente. Die innere Stützstruktur des Körpers bildet das Skelett, welches bei Erwachsenen aus 206 Knochen besteht. Die Knochen sind durch Gelenke miteinander verbunden, wobei die Gelenke bis zu drei unterschiedliche Bewegungsachsen realisieren. Die Gelenke haben einen komplexen Aufbau, der vielfältige Funktionen absichert. Der Gelenkknorpel dient der Reibungsminimierung während des Bewegungsverlaufes sowie der Stoßdämpfung. Die Gelenkkapsel sorgt einerseits für die Stabilisierung des Gelenkes, andererseits enthält sie die Gelenkflüssigkeit, welche das Gelenk schmiert. Bänder verbinden Knochen miteinander und stabilisieren die Gelenke.

Die Antriebskraft der autonomen menschlichen Bewegungen erzeugen die insgesamt 640 Skelettmuskeln, in denen die chemische Energie der Nahrung in mechanische Energie und Wärme umgewandelt wird (McCracken, 1999; Paulsen & Waschke, 2010).

Wesentlichen Einfluss auf das Bewegungsverhalten haben individuelle körperliche Eigenschaften, etwa die Körpergroße oder Proportionen. Diese Aspekte werden zusammenfassend unter dem Begriff Anthropometrie (griech. Anthropos = Mensch, Metrie = Messen) beschrieben. Unterschieden werden Größenklassen von Körpermaßen, in der Regel in Form von Perzentilen angegeben. Neben den bloßen Abmessungen werden Proportionen und Statur in Konstitutionstypen unterschieden (Zalpour, 2006).

Die verschiedenen möglichen Bewegungsmuster unterscheiden sich auch hinsichtlich der jeweils maximal aufzubringenden Kräfte. Diese sind sowohl von der Richtung als auch von der grundlegenden Körperhaltung abhängig (Wakula, et al., 2009). Weiterhin werden altersbedingte Veränderungen der Beweglichkeit beschrieben, wobei davon auszugehen ist, dass mit zunehmendem Alter eine Verringerung der Bewegungsmöglichkeiten einsetzt (Spanner-Ulmer, Scherf, & Sjuts, 2010).

In der arbeitswissenschaftlichen Normung werden Aussagen zu den Bewegungsspielräumen einzelner Gelenke in Form von Grenz- und Vorzugsbereichen beschrieben. Demzufolge können aus der Vielzahl möglicher

Körperstellungen und Bewegungshandlungen solche identifiziert werden, die im Rahmen der Arbeitsgestaltung als förderlich angesehen werden (Deutsches Institut für Normung, 2009). Langfristige Exposition hoher Belastungen durch einseitige Bewegungsmuster kann zu Erkrankungen führen. Geschieht dies im Rahmen der Arbeitsausführung, so handelt es sich um Berufskrankheiten, wobei unter anderem Erkrankungen in den Gelenken oder der Bandscheiben auftreten können (Deutscher Bundestag, 2009). Demzufolge ist bei der Arbeitsgestaltung darauf zu achten, dass überlastende Körperstellungen und Bewegungsmuster vermieden werden.
Die Ausführungen zur Physiologie zeigen, dass menschliche Bewegungen äußert komplex und vielfältig sind, weshalb zur Klärung der Fragestellung bzgl. der Bewegungssimulation vereinfachende Modelle zu nutzen sind. Hierfür dient die physikalische Beschreibung von Bewegungen, welche im nachfolgenden Abschnitt diskutiert wird.

2.1.3 Physikalische Grundlagen

Im physikalischen Sinne beschreibt Bewegung die relative räumliche Veränderung eines Objektes im Zeitverlauf. In der Bewegungslehre wird zwischen der Kinematik und der Dynamik unterschieden. Während die Kinematik die Gesetzmäßigkeiten der Bewegung betrachtet, behandelt die Dynamik die Kräfte als Ursache der Bewegungsabläufe. Es gibt zwei grundlegende Arten von Bewegungen: Geradlinige Bewegung (Translation) und Drehbewegung (Rotation), wobei Überlagerungen möglich sind. Wichtige Größen zur Beschreibung der Kinematik sind Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung bzw. Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung. Es handelt sich hierbei um vektorielle Größen, die sich jeweils aus Betrag und Richtung zusammensetzen. Wesentliche Grundgrößen der Dynamik sind Masse, Kraft, Impuls, Massenträgheitsmoment, Drehmoment und Drehimpuls (Kuchling, 2001).
Die Vielzahl an Knochen und Muskeln im menschlichen Körper führt zu mehr als 100 beweglichen Gelenken, woraus eine Vielzahl an Bewegungskombinationen erwächst. Industrieroboter besitzen mit zumeist fünf bis sechs Rotationsfreiheitsgraden sowie ggf. einer siebenten Tanslationsachse vergleichsweise wenige Bewegungsmöglichkeiten. Dennoch lässt sich bereits hier die Bewegung des Werkzeugaufsatzes am Roboter nicht eindeutig beschreiben (Feldmann, Sutano, & Brossog, 2005). In Abbildung 1 sind beispielhaft zwei mögliche Gelenkkonfigurationen eines Industrieroboters dargestellt, die dem Erreichen derselben Zielposition dienen. Die Bewegung erfolgt von der Ausgangskonfiguration hin zu zwei unterschiedlichen Endkonfigurationen, wobei drei Achsen an der Bewegung beteiligt sind, die sich jeweils in unterschiedliche Drehrichtungen bewegen. Dabei sind einerseits unterschiedliche Endzustände des Systems möglich,

andererseits kann sich auch die zeitliche Änderung der Freiheitsgrade unterscheiden, diese kann außerdem sowohl simultan als auch konsekutiv erfolgen.

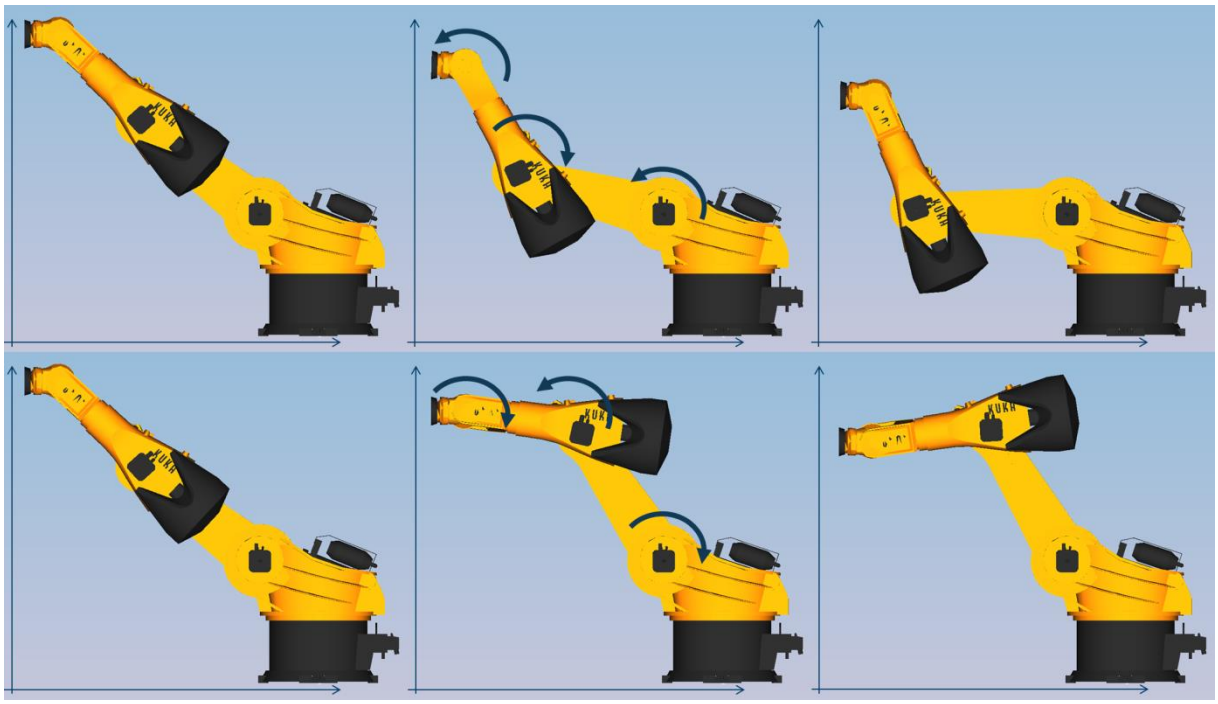


Abbildung 1 - Alternative Gelenkkonfigurationen eines Industrieroboters

Das Beispiel verdeutlicht die Notwendigkeit einer Komplexitätsreduzierung, wenn menschliche Bewegungen modelliert werden sollen. In der Physik werden zur vereinfachten Beschreibung Modellannahmen getroffen. Die höchstmögliche Idealisierung stellt hierbei der Massepunkt dar, wobei ein Körper auf einen einzelnen Punkt reduziert wird, der lediglich eine Lage und eine Masse besitzt. Weitere Eigenschaften, etwa Volumen, Form oder Masseverteilung werden vernachlässigt. Ein Punkt besitzt im Raum drei Freiheitsgrade, d. h. drei unabhängige Veränderliche, nämlich Translation entlang der drei Achsen x, y, und z (Zeitler & Simon, 1998).
Die Raumkurve, entlang derer sich ein Punkt bewegt, wird als Trajektorie bezeichnet. Sie wird durch den Ortsvektor $\vec{r}$(t) beschrieben.
Eine Ansammlung einzelner Massepunkte wird als starrer Körper bezeichnet. Ein starrer Körper besitzt insgesamt sechs Freiheitsgrade, neben der Translation entlang der drei Achsen x, y und z auch die Rotation um eben diese.
Zur Beschreibung der Lage eines starren Körpers werden zwei Koordinatensysteme benötigt, einerseits das globale, raumfeste Koordinatensystem und andererseits ein aus drei Punkten des starren Körpers definiertes körperfestes, lokales Koordinatensystem.
Sind mehrere Einzelkörper miteinander verbunden, so handelt es sich um ein Mehrkörpersystem. Die wesentlichen Eigenschaften eines solchen Systems sind dessen Freiheitsgrade sowie etwaige Zwangsbedingungen. Als Zwangsbedingungen werden Einschränkungen der Freiheitsgrade eines Einzelkörpers bezeichnet. Sind

die einzelnen Elemente des Mehrkörpersystems durch Gelenke miteinander verbunden, so handelt es sich um eine kinematische Kette. Das letzte Glied einer solchen kinematischen Kette wird als Endeffektor bezeichnet. Die Trajektorie des Endeffektors wird durch die Kombination einzelner Bewegungen der Teile der kinematischen Kette bestimmt, wobei es dafür mehrere Möglichkeiten geben kann (Woernle, 2011).

Technisch anspruchsvolle kinematische Ketten finden sich beispielsweise in Industrierobotern. Diese bilden kinematische Ketten bestehend aus mehreren Rotationsachsen. Die Bewegung des Endeffektors resultiert aus den Winkeländerungen der einzelnen Freiheitsgrade. In der Robotik wird für diesen Zusammenhang der Begriff Vorwärtskinematik verwendet. Vorwärtskinematik beschreibt die Berechnung der Lage eines Endeffektors ausgehend von den Gelenkvariablen.

Der umgekehrte Weg, also die Berechnung der Gelenkvariablen aus der Lage des Endeffektors wird als inverse Kinematik bezeichnet. Da für eine definierte Endlage gegebenenfalls mehrere Kombinationen von Gelenkparametern möglich sind, lässt sich nicht in jedem Fall eine eindeutige Lösung bestimmen. Um eine eindeutige Bewegung zu definieren, müssen Randbedingungen bzw. Optimierungskriterien festgelegt werden, etwa die Forderung nach dem kürzesten Weg oder die Festlegung der Reihenfolge, in welcher die Freiheitsgrade variieren sollen.

Die Komplexität der Problemstellung erhöht sich bedeutend, wenn dynamische Größen berücksichtigt werden. So beeinflussen etwa die durch die Masse der Einzelkörper verursachte Trägheit oder etwaige Reibungskräfte den Bewegungsverlauf. Ferner kann es sich bei den Einzelkörpern um nicht-starre, also elastische Körper handeln, welche sich bei Bewegung verformen. Zur Berechnung der Bewegungsgleichungen starrer Mehrkörpersysteme werden in der Praxis zumeist numerische Methoden der Mehrkörperdynamik verwendet. Für elastische Körper kommt vorwiegend die Finite Elemente Methode zum Einsatz. Der Komplexitätsreduzierung dienen vereinfachende Modellannahmen, etwa Reibungsfreiheit in Gelenken. In der Biomechanik werden die physikalischen Modelle zur Beschreibung und Bewertung der menschlichen Bewegung verwendet, die durch die komplexe, menschliche Physiologie geprägt ist (Keppler, 2003; Schramm, Hiller, & Bardini, 2010; Rill & Schaeffer, 2010; Woernle, 2011; Gattringer, 2011).

Die Komplexität des menschlichen Körpers macht deutlich, dass je nach Untersuchungskriterium eine entsprechende Modellbildung zur Approximation notwendig ist. Für die biomechanische Modellierung des Menschen hat sich die Anwendung von Starrkörpermodellen durchgesetzt (Stelzner, 2008).

Zur Beschreibung der Bewegung des Hand-Arm-Systems etwa wird dieses auf wenige, verkettete starre Körper reduziert. Allein der Unterarm besteht aus zwei

Knochen, Elle und Speiche, die eine Rotationsbewegung des Unterarms in Form einer geschlossenen kinematischen Kette realisieren.
Ein einfaches mögliches Modell des Hand-Arm-Systems ist in Abbildung 2 dargestellt. Es besteht aus den drei Festkörpern Hand, Unterarm und Oberarm. Schultergelenk und Handgelenk verfügen jeweils über drei Rotations-Freiheitsgrade, der Ellbogen über einen Rotations-Freiheitsgrad. Mit dem gewählten Modell kann die Bewegung der Hand zu einem Zielpunkt in Bezug zum Fixpunkt am Schultergelenk über die sieben Gelenkwinkel beschrieben werden.

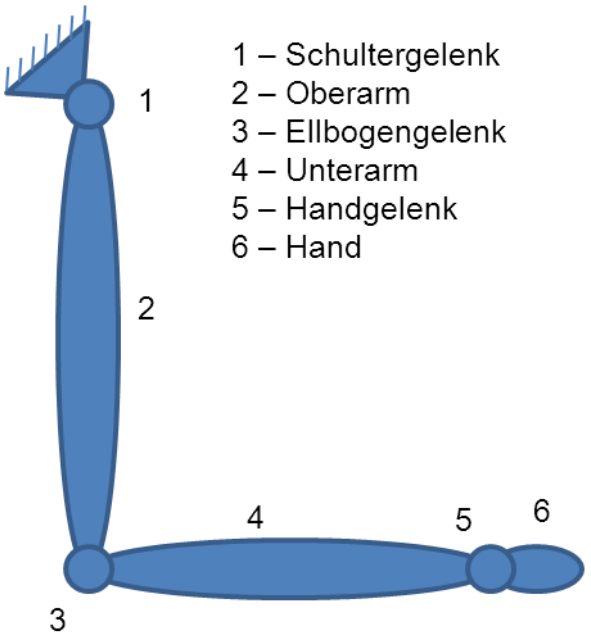


Abbildung 2 - Kinematisches Modell des menschlichen Arms

Die Modellbildung ist Basis der Bewegungsanalyse, welche im nachfolgenden Abschnitt 2.1.4 diskutiert wird. Eine weitergehende Detaillierung zur Modellierung des menschlichen Körpers erfolgt in Kapitel 2.4 – Digitale Menschmodelle.

2.1.4 Bewegungsanalyse und -modellierung

Bewegungsanalysen dienen vielseitigen Aspekten, vorwiegend aus medizinischen und technischen Disziplinen. Als konkrete Beispiele seien stellvertretend die Evaluation des Gehens im Hinblick auf orthopädische Rehabilitation, die Optimierung von Bewegungsabläufen im Leistungssport, die Modellierung der Bewegung im Medienbereich oder die Rationalisierung von Arbeitsabläufen in der Industrie genannt. Historisch reicht die Analyse von Bewegungen bereits bis zu den Urmenschen zurück, welche anhand des Bewegungsverhaltens von Gruppenmitgliedern deren Eignung für die Jagd einschätzten (Tober & Köhler, 2009). Bewegungsanalyse heißt zunächst einmal Erfassung und Auswertung realer Bewegungen. Sie dient zumeist der gezielten Veränderung oder aber der Prognose

von Bewegungsmustern. Bewegungsanalytische Untersuchungen berücksichtigen dabei sehr unterschiedliche Aspekte. Erste Studien widmeten sich der Ganganalyse (Weber & Weber, 1836; Fischer & Braune, 1899), In der Produktgestaltung werden beispielsweise Einstiegvorgänge in Fahrzeuge betrachtet (Sabbah, Bubb, & Bengler, 2010), während im Kontext der Arbeitsplatzgestaltung bspw. die Handhabung empfindlicher Objekte analysiert wird (Diaz Meyer, 2008).

Zur Bewegungsanalyse ist eine Beschreibung der Lage des menschlichen Körpers notwendig, dies umfasst den Ort, an dem der Körper sich relativ zu einem ortsfesten Koordinatensystem befindet, seine Orientierung sowie die Körperstellung, also die Lage der Körperteile zueinander (Saziorski, Aruin, & Selujanow, 1984).

Zur Bewegungsanalyse kommen unterschiedliche Methoden zum Einsatz (Loosch, 1999):

- Bildgebende Verfahren:
    - Film und Foto;
    - Lichtspur- oder Impulslichtaufnahmen;
- Messverfahren:
    - Kinemetrie (Messung kinetischer Größen), z. B. mit Hilfe von Lichtschranken, Inklinometern, Goniometern;
    - Dynamometrie (Messung dynamischer Größen), z. B. mit Hilfe von Dehnungsmesstreifen oder Kraftmessplatten);
    - Erfassung neurophysiologischer Prozesse, z. B. Elektroenzephalografie (EEG) zur Erfassung von Hirnaktivitäten;
    - Erfassung muskelphysiologischer Prozesse, z. B. Elektromyografie (EMG) zur Messung der elektrischen Muskelaktivität;
- Beobachtung und Befragung;
- Tests oder Experimente;
- Modellbildung und Simulation.

Eine weitere Möglichkeit ist die Auswertung von Folgeerscheinungen, welche auf die Bewegung zurückzuführen sind, etwa um Anstrengungswirkungen von Bewegungen zu untersuchen. Hierfür können Körperfunktionswerte, wie Herzfrequenz, Atemfrequenz oder Hauttemperatur, erfasst werden (Scherf, Leitner-Mai, Börner, & Spanner-Ulmer, 2010), wobei auch eine Kombination mit anderen Messmethoden möglich ist (Weber, B., 2010).

Eine sehr exakte Methode für die Analyse realer Bewegungen ist die Erfassung des Bewegungsvorganges in digitalisierter Form, das so genannte Motion Capturing. Sturman (1994) definiert Motion Capturing (MoCap) als das *„Aufzeichnen von Bewegung für die direkte oder spätere Analyse oder zum Abspielen*“.

MoCap-Systeme wurden für unterschiedliche Einsatzgebiete entwickelt, etwa zur Anwendung in der Unterhaltungsindustrie oder für die Untersuchung ergonomischer Fragestellungen (Klippert, et al., 2008).

In der Regel erfolgt diese Aufzeichnung mit Hilfe von am realen Probanden angebrachten Sensoren, sog. Marker, zur Aufnahme von Positionen und ggf. auch deren Orientierung. Die Signalerfassung erfolgt zumeist elektromechanisch, elektromagnetisch, optisch oder akustisch (Morr, Wiechel, & Metzler, 2009). Zur Auswertung werden die erfassten Bewegungen mittels inverser Kinematik auf ein digitales Menschmodell übertragen. Jeder Systemtyp weist spezifische Vor- und Nachteile auf. So können etwa elektromagnetische Systeme von unerwünschten Störsignalen aus der Umgebung beeinflusst werden. Bei optischen Systemen hingegen kann es zu Verdeckungen durch Störgeometrien kommen. Um entsprechende Nachteile einzelner Systeme zu kompensieren, wurden Kombinationssysteme entwickelt. (Jackèl, Neunreither, & Wagner, 2006; Gudehus, 2008). Außerdem gibt es markerlose Systeme, welche ebenfalls eine optische Erfassung der Bewegungen ermöglichen, jedoch keine Anbringung von Sensoren am Probanden benötigen (Klippert, et al., 2008). Markerlose Systeme werden auch im Bereich der Unterhaltungselektronik entwickelt, wo deutlich geringere Anschaffungskosten realisiert werden können. Erste Untersuchungen zeigten, dass deren Einsatz für ergonomische Untersuchungen generell möglich ist, wenngleich der aktuelle Entwicklungsstand als noch nicht ausreichend einzuschätzen ist (Wischniewski, Hold, & Lehmann, 2012). Für die Erfassung von Fingerbewegung wurden spezielle Datenhandschuhe entwickelt, Blickbewegungen lassen sich mit am Kopf befestigten Displays (Head-Mounted Displays) aufnehmen (Godin & Chiang, 2009).

Menschliche Bewegungen zeigen zwar konstante äußere Merkmale, mit Hilfe derer eine Klassifizierung von Bewegungen möglich ist, variieren jedoch aufgrund der enormen Komplexität des biologischen Bewegungssystems selbst unter konstanten Bedingungen erheblich (Stein, et al., 2008). Bei der Untersuchung menschlicher Bewegungen zum Zweck der Prädiktion von Bewegungsmustern ist zu beachten, dass sich die Ausführung von Bewegungsaufgaben sowohl interindividuell als auch intraindividuell unterscheidet (Beth, et al., 2002; Fröhmel, 2010). Das menschliche Bewegungsverhalten ist äußerst komplex, da es situationsabhängig von einer Vielzahl an Faktoren abhängt. Deshalb erfolgt die Modellierung im Regelfall unter der Annahme, dass Menschen zu typischen, stochastisch beschreibbaren Bewegungsmustern neigen (Bortot, et al., 2010). Alternative Ansätze beschreiben die Einführung von Optimalitätskriterien, etwa minimaler Energieaufwand, um aus der umfangreichen möglichen Bewegungsvarianz konkrete Bewegungsbahnen auswählen zu können (Flash, Hogan, & Richardson, 1995; Blickhan, 1997; Alexander, R. M., 1997).

Alexander (Alexander, T., 2010) beschreibt ein Modell zur Abbildung von Bewegungsbahnen-Hüllkurven mittels Regressionsanalysen real erfasster

Bewegungen, mit dem sowohl die zentrale Tendenz als auch die Varianz der Bewegungen prognostiziert werden können.
Die Modellierung von Bewegungen beinhaltet auch die Betrachtung der zugrundeliegenden neurophysiologischen Steuerungsmechanismen. An der Bewegungssteuerung sind demzufolge neben der Extremität auch die Augen sowie der Kopf beteiligt. Dieses Zusammenspiel kann in Form dreier Kontrollschienen modelliert werden. Während der Bewegungshandlung laufen parallel eine optische, eine Ausrichtungs- und eine Transportkomponente ab, d. h. es erfolgt eine optische Erfassung des Bewegungsraumes, ein Vorausrichten der Extremität und der Transport, also die Bewegung vom Start- zum Zielpunkt (Arlt, 1999).
Trotz der komplexen Steuerungsmechanismen wie auch der zahlreich vorhandenen Freiheitsgrade konnte festgestellt werden, dass sich bei Bewegungsanalysen gleichartige, wiederkehrende Bewegungsmuster identifizieren lassen. Diese eignen sich als Basis für die Bewegungssynthese (Aubry, Julliard, & Gibet, 2009; Liu, Hertzmann, & Popovic, 2005; Gibet & Marteau, 2003). Dabei sollten grundsätzlich wenige Probanden eingesetzt, gleichwohl aber eine hohe Anzahl an Wiederholungen erfasst werden (Stein, 2010). Für die Bewegungsmodellierung werden heute meist mittels Motion Capturing erfasste Trajektorien auf Mehrkörpermodelle des menschlichen Körpers übertragen. Dabei werden die Informationen ggf. um weitere biomechanische Daten, die etwa über Kraftmessplatten aufgenommen werden, ergänzt. Die realen Daten dienen in Kombination mit Optimierungsverfahren der Mehrkörpersimulation der Synthese menschlicher Bewegungen (Simonidis, 2010).
Neben Ansätzen, welchen real erfasste Bewegungen zu Grunde liegen, wurden Methoden entwickelt, die analytische Bewegungsprädiktion anhand kinematisch-dynamischer Optimierungsalgorithmen ermöglichen (Abdel-Malek & Arora, 2009). Vorteilhaft dabei ist, dass keine aufwendige Datenerfassung notwendig ist. Nachteilig ist jedoch die Tatsache, dass die prognostizierten Bewegungen idealisiert sind, während reale menschliche Bewegungen nicht zwingend Kriterien wie Energieoptimalität genügen.

2.1.5 Zusammenfassung

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist die schnelle Modellierung und Prognose realgetreuer menschlicher Bewegungen für digitale Menschmodelle. Die diskutierten Grundlagen zeigen, dass diese als ein äußerst komplexes Zusammenspiel emotionaler, kognitiver und sensomotorischer Prozesse erfolgen und Bewegungsziele auf unterschiedliche Weise erreicht werden können. Die durch das Muskel- und Skelettsystem realisierten Bewegungen werden für Untersuchungszwecke in vereinfachte physikalische Modelle überführt. Die Bewegungserfassung erfolgt zumeist mittels sog. Motion Capturing Systeme, die anschließende Auswertung mit Hilfe von Mehrkörpermodellen. Trotz der Komplexität

und Vielfältigkeit können gleichartige, wiederkehrende Muster identifiziert werden, die als Basis zur Bewegungssynthese geeignet sind.

2.2 Strukturierungsmodelle menschlicher Arbeit und Bewegung

Die in dieser Arbeit angestrebte Generierung menschlicher Bewegungen setzt eine geeignete Semantik voraus, mit der die Bewegungshandlungen beschrieben und strukturiert werden können. Dabei kann auf bereits vorhandene Strukturierungsmodelle zurückgegriffen werden. Zur Beschreibung und Komplexitätsreduzierung werden Arbeitstätigkeiten je nach Kontext in verschiedene Abstraktionsniveaus untergliedert. Diese Strukturierung kann sowohl technologisch orientiert als auch im Hinblick auf arbeitsorganisatorische Aspekte erfolgen.

2.2.1 Strukturierung aus technologischer Sicht

Produktion bzw. Produktionstechnik lässt sich vielseitig untergliedern, beispielsweise bezüglich der Stoffe bzw. Produkte in Verfahrenstechnik, Verarbeitungstechnik und Fertigungstechnik (Awiszus, Bast, Dürr, & Matthes, 2003) oder hinsichtlich der Verrichtungen bzw. Prozesse (REFA Bundesverband e. V., 2002). Dies unterscheidet sich insbesondere branchenspezifisch, so wird etwa im Fahrzeugbau gegliedert in Presswerk, Karosseriebau, Lack und Montage.
Produktionstechnik wird gemäß DIN 8580 (2003) untergliedert in sechs Hauptgruppen von Fertigungsverfahren. Unterscheidungskriterium ist dabei die Auswirkung auf den Zusammenhalt der Teilchen eines Festkörpers bzw. der Teile eines zusammengesetzten Körpers:

- Urformen (Zusammenhalt schaffen),
- Umformen (Zusammenhalt beibehalten),
- Trennen (Zusammenhalt vermindern),
- Fügen (Zusammenhalt vermehren),
- Beschichten (Zusammenhalt vermehren) sowie
- Stoffeigenschaften ändern.

Diese Strukturierung orientiert sich einzig an der Auswirkung auf das Produkt, ein Bezug zur Arbeit und Bewegung des Menschen fehlt gänzlich bzw. beschränkt sich dieser vorwiegend auf einzelne Bereiche. Fokussiert auf menschliche Tätigkeiten ist insbesondere das Handhaben, welches in der VDI-Richtlinie 2860 (1990) untergliedert wird in:

- Speichern,
- Mengen verändern,
- Bewegen,
- Sichern und
- Kontrollieren.

Diese rein technologisch orientierten Gliederungen berücksichtigen allein die Einwirkung auf einen Körper bzw. einen Stoff, nicht aber die dafür notwendigen manuellen Tätigkeiten. Vielmehr kann auch eine vollständig automatisierte Ausführung der Verfahren ohne Einwirkung des Menschen erfolgen, weshalb sich diese Art der Strukturierung im Hinblick auf menschliche Arbeit nur bedingt eignet. Daher werden im Weiteren Strukturierungsmodelle aus arbeitsorganisatorischer Sicht thematisiert.

2.2.2 Strukturierung aus arbeitsorganisatorischer Sicht

Arbeitsorganisatorische Strukturierungsmodelle werden insbesondere in Zusammenhang mit Methoden zur Vorgabezeitermittlung beschrieben. Dabei gilt es, Arbeit vertikal, d. h. vom groben Gesamtablauf hin zu fein-granularen Abschnitten zu detaillieren und jedem Vorgang eine definierte Soll-Zeit zuzuweisen.
Bullinger (1986) bzw. REFA (2002) entwickelten prozessablauforientierte Ordnungsschemata mit sieben Stufen:

- Projekt bzw. Gesamtablauf
- Teilprojekt bzw. Teilablauf,
- Projektstufe bzw. Ablaufstufe
- Vorgang,
- Teilvorgang,
- Vorgangsstufe und
- Vorgangselement.

Neben dieser vertikalen Gliederung vom Gesamtablauf hin zu fein granularen Bestandteilen werden bei REFA auch horizontal Unterscheidungen bzgl. der Ablauf- oder Zeitart getroffen. Das bedeutet, es wird bei gleicher Detaillierung hinsichtlich des Zwecks der Tätigkeiten unterschieden, wobei hier explizit zwischen Abläufen des Betriebsmittels und des Menschen unterschieden wird (Tabelle 1).

Tabelle 1 - Zeitartengliederung nach REFA (2002)

<table>
<tr><th colspan="8">Auftragszeit</th></tr>
<tr><td colspan="3">Rüstzeit</td><td colspan="5">Ausführungszeit</td></tr>
<tr><td>Rüstgrund-zeit</td><td>Rüsterhol-zeit</td><td>Rüstverteil-zeit</td><td colspan="5">Zeit je Einheit</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="4"></td><td colspan="3">Grundzeit</td><td>Erhol-zeit</td><td colspan="2">Verteilzeit</td></tr>
<tr><td colspan="2">Tätigkeitszeit (Haupt-, Nebentätigkeit)</td><td>Warte-zeit</td><td rowspan="3"></td><td>sachlich</td><td>persönlich</td></tr>
<tr><td colspan="2">beeinflussbar</td><td colspan="2">unbeeinflussbar</td></tr>
<tr><td>voll</td><td>teilweise</td><td colspan="3"></td></tr>
</table>

In ganzheitlichen Produktionssystemen wird ebenfalls horizontal unterschieden, wobei hier der Gesichtspunkt der Wertschöpfung im Vordergrund steht. Neben den

rein wertschöpfenden Tätigkeiten werden unterschiedliche Arten von Verschwendungen klassifiziert, bspw. unnötige Prozesse oder auch Bewegungen (Ohno, 1993). Horizontale Untergliederung dient demnach der Auswertung von Arbeitsprozessen hinsichtlich der Effizienz und hilft, Potentiale der Prozessverbesserung zu erkennen. Vertikale Untergliederung hingegen dient der Komplexitätsreduzierung und Modularisierung, um Arbeitsprozesse zu planen und zu beschreiben.

Eine wiederum vertikale Gliederung wird bei den Systemen vorbestimmter Zeiten (SvZ) angewandt. So wird bei MTM (Methods Time Measurement) unterschieden in sechs Niveaus (Bokranz & Landau, 2006):

- Grundbewegung,
- Bewegungsfolge,
- Grundvorgang,
- Vorgangschritt,
- Vorgangsfolge und
- Arbeitsvorgang.

Eine Gegenüberstellung der vertikalen Hierarchiemodelle vom MTM und REFA einschließlich typischer Beispiele ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2 - Gegenüberstellung der Strukturierungsmodelle von REFA und MTM

REFA	**MTM**	**Beispiele**
Gesamtablauf		Herstellung Gesamtfahrzeug
Teilablauf		Montage Gesamtfahrzeug
Ablaufstufe		Bandabschnitt Montage Interieur
Vorgang		ZSB Mittelkonsole montieren
Teilvorgang	Arbeitsvorgang	Antenne in Mittelkonsole montieren
	Vorgangsfolge	Mittelkonsole in Vorrichtung einlegen und spannen
	Vorgangsschritt	Mittelkonsole in Vorrichtung einlegen
Vorgangsstufe	Grundvorgang	Antenne aus Ladungsträger entnehmen und bereitlegen
	Bewegungsfolge	Antenne aufnehmen
Vorgangselement	Grundbewegung	Hinlangen zur Antenne

Während REFA eine vollständige Beschreibung der betrieblichen Arbeitsorganisation fokussiert, dient MTM insbesondere der Beschreibung und Optimierung manueller Arbeitsprozesse und behandelt damit einen Teilbereich der durch die REFA-Methodik abgedeckten prozessorientierten Arbeitsorganisation. Beiden gemeinsam ist die zeitwirtschaftliche Orientierung. Unabhängig davon, ob die Vorgabezeit durch Bewegungsstudien oder bloße Zeitaufnahmen gewonnen wird, bezweckt die Strukturierung und zeitliche Beschreibung eine Steigerung der Arbeitsleistung bzw.

optimierte Arbeitsgestaltung (REFA Bundesverband e. V., 2002; Bokranz & Landau, 2006).
Gliederungen aus arbeitsorganisatorischer Sicht, insbesondere vertikal, eignen sich zur Tätigkeitsbeschreibung, da der Fokus auf der Arbeitsverrichtung des Menschen liegt. Unzureichend ist jedoch der Bezug zur tatsächlichen menschlichen Bewegung, da dieser lediglich im Hinblick auf deren Ausführungszeit gegeben ist. Hierfür bedarf es einer Betrachtung aus tätigkeitsunabhängiger Sicht.

2.2.3 Strukturierung von Bewegungen aus tätigkeitsunabhängiger Sicht

In den SvZ erfolgt auf der Ebene der Grundbewegungen eine Unterscheidung zwischen Bewegungen der Arme und Hände, der Füße und Beine oder des gesamten Körpers. Die jeweiligen Bewegungen sind mit zeitbestimmenden Parametern belegt, etwa der notwendigen Zielgenauigkeit beim Hinlangen zu einem Gegenstand. Eine vollständige Bewegungsbeschreibung ist einer Ablaufanalyse jedoch nicht zu entnehmen, da jeweils nur zeitbestimmende Bewegungen dokumentiert werden und Überlappungen möglich sind. Um nicht nur bezüglich der notwendigen Dauer sondern auch hinsichtlich der beteiligten Körperbereiche differenzieren zu können, sind die Bewegungen nach den jeweiligen physiologischen Funktionseinheiten zu strukturieren (Leidholdt, Fischer, & Mühlstedt, 2010).
Göhner (1987) beschreibt als Vorgehen zur Bewegungsanalyse die Zerlegung von Bewegungsabläufen in funktional abgeschlossene Teilbewegungen mit je einem eigenen Bewegungsziel, wobei vier Aspekte betrachtet werden:

- die subjektbezogene Bewegungsrichtung,
- die zu beschreibenden Stellen des Körpers, hierarchisch gegliedert vom gesamten Körper zu Körperteilen,
- Ausgangs- und Endposition sowie
- der Zeitaspekt.

2.2.4 Zusammenfassung

Zur Beschreibung und Komplexitätsreduzierung werden Arbeit und Bewegung strukturiert. Dabei kann dies aus verschiedenen Blickwinkeln, technologisch oder arbeitsorganisatorisch orientiert, wie auch aus tätigkeitsunabhängiger Betrachtung heraus erfolgen. So lässt sich jeder komplexe Arbeitsablauf in Teilschritte und, bezogen auf den Menschen letztlich in Grundbewegungen gliedern. Aus dieser Gliederungssystematik lässt sich eine Semantik für die Bewegungssynthese ableiten, wobei die jeweiligen physiologischen Funktionseinheiten als strukturbildende Elemente verwendet werden sollten.

2.3 Arbeitsgestaltung und Ergonomie

2.3.1 Begriffsbestimmung

Als Arbeitsgestaltung wird die *„Auslegung von Arbeitssystemen nach technischen, ökonomischen und ergonomischen Erkenntnissen“* (Landau, 2007, S. 103) bezeichnet.
Dies umfasst die folgenden sieben Aspekte:

- Gestaltung der Anthropometrie,
- Bewegungstechnische Arbeitsgestaltung,
- Gestaltung der Arbeitsorganisation,
- Physiologische Arbeitsgestaltung,
- Informationstechnische Arbeitsgestaltung,
- Sicherheitstechnische Arbeitsgestaltung und
- Gestaltung der Arbeitsumgebung.

Die wissenschaftliche Disziplin, die sich mit der Arbeitsgestaltung beschäftigt, ist die Arbeitswissenschaft bzw. Ergonomie. Die europäische Norm DIN EN 614-1 (2009) definiert beide Begriffe synonym als:

„[…] wissenschaftliche Disziplin, die sich mit dem Verständnis der Wechselwirkungen zwischen menschlichen und anderen Elementen eines Systems befasst und der Berufszweig, der Theorie, Prinzipien, Daten und Methoden auf die Gestaltung von Arbeitssystemen anwendet mit dem Ziel, das Wohlbefinden des Menschen und die Leistung des Gesamtsystems zu optimieren.“

Alternativ kann Ergonomie auch als eine Teildisziplin der Arbeitswissenschaft verstanden werden, welche *„sich nach Maß und Zahl um die Arbeitsgestaltung bemüht“* (Schmidtke, 1993, S. 6). Ergonomie beschreibt demnach die praktische Anwendung arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse zur Gestaltung der menschlichen Arbeit mit dem Ziel, die Leistungsfähigkeit des gesamten Arbeitssystems zu erhöhen und die auf den Menschen einwirkenden Belastungen zu vermindern.
Darüber hinaus wird Ergonomie nicht nur als wissenschaftliche Disziplin betrachtet sondern auch als ein Zustand bzw. ein Kriterium zur Beschreibung eines Arbeitssystems. So wird beispielsweise in der Praxis häufig von guter oder schlechter Ergonomie gesprochen.
Die Arbeitsgestaltung dient der Entwicklung von Arbeitssystemen (Abbildung 3). Diese werden beschrieben durch die Elemente Mensch, Maschine und Umwelt. Zweck eines Arbeitssystems ist die Ausführung einer Aufgabe zur Erzielung eines Ergebnisses, wobei eine ständige Rückmeldung über den Verlauf erfolgt (Bubb & Seifert, 1993).

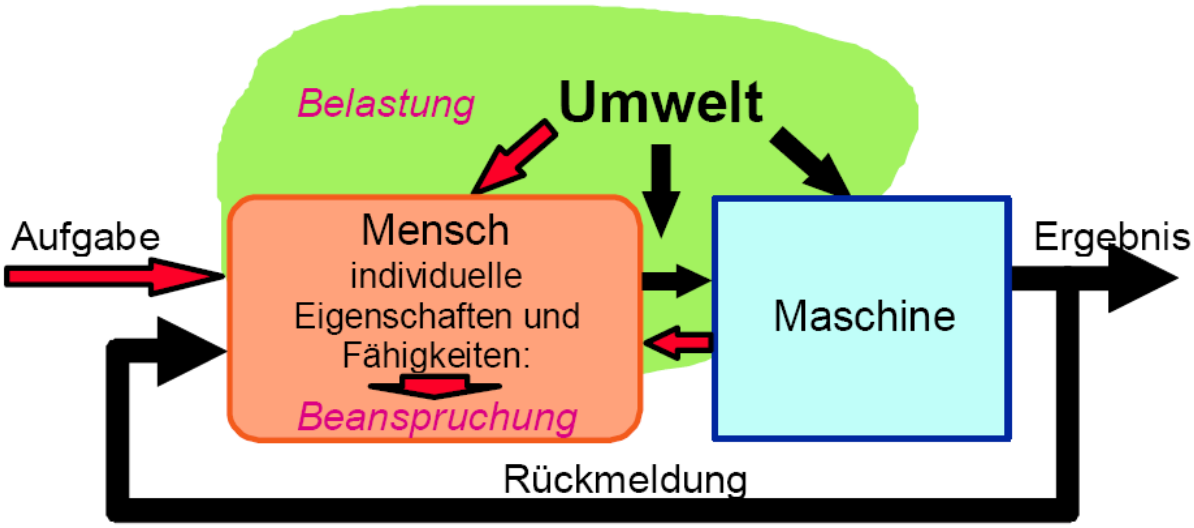


Abbildung 3 - Arbeitssystemmodell nach Bubb (1993)

Das Belastungs-Beanspruchungs-Modell unterscheidet zwischen von außen auf den Menschen einwirkenden Belastungen und daraufhin innerhalb des Menschen wirkender Beanspruchung in Abhängigkeit seiner individuellen Eigenschaften und Fähigkeiten (Rohmert, 1984).

In der industriellen Praxis obliegt die Arbeitsgestaltung zumeist dem Industrial Engineering (IE), welches sich im weitesten Sinne mit der Gestaltung des Zusammenwirkens von Mensch, Technik und Organisation beschäftigt, wobei vielfältige Definitionen existieren (Spanner-Ulmer, 2009). In der historischen Entwicklung hat sich der Fokus des IE verschoben von einer überwiegenden Technikorientierung hin zu einer ausgewogenen Betrachtung, welche den Menschen in der Organisation im Vordergrund sieht (Hensel-Unger, 2011).

Von ganzheitlicher Arbeitsgestaltung wird gesprochen, sofern alle eingangs genannten sieben Bestandteile, ergänzt um psychologische Aspekte, berücksichtigt werden. Dabei sollten diese bereits in die Produktgestaltung eingebunden werden. Diese Vorgehensweise wird als konzeptive (Luczak, 1991; Landau, 2007) bzw. auch prospektive (Schlick, Bruder, & Luczak, 2010) Ergonomie bezeichnet. Unter dem Gesichtspunkt der Vorbeugung von Schädigungen und Beeinträchtigungen sowie der möglichst effizienten Ressourcennutzung wird außerdem der Begriff präventive Arbeitsgestaltung verwendet (Landau, 2007). Belastungen resultieren aus der Arbeitsaufgabe und der Arbeitsumwelt wie auch dem Mensch-Maschine-System, demzufolge sind im Sinne einer ganzheitlichen Arbeitsgestaltung sämtliche Elemente des Arbeitssystems zu berücksichtigen.

2.3.2 Dimensionen der Arbeitsgestaltung

Arbeitsgestaltung kann sich auf unterschiedliche Dimensionen auswirken. Maslow (1954) entwickelte eine pyramidale Darstellung von Bedürfnissen, welche von der

Absicherung von Grundbedürfnissen über soziale Komponenten bis hin zur Selbstverwirklichung reicht. Die Gestaltung der Arbeit kann dabei helfen, einen Teil dieser Bedürfnisse zu befriedigen.

Herzberg (Herzberg, Mausner, & Snyderman, 1959) unterscheidet zwischen Motivatoren (Satisfiers), welche die Zufriedenheit des Menschen erhöhen und Hygienefaktoren (Dissatisfiers), welche Unzufriedenheit abbauen. Die Gestaltung der Arbeitsbedingungen dient nach dieser Betrachtung zunächst als Hygienefaktor, wobei die Arbeitstätigkeit selbst hingegen als Motivator wirken kann.

Rohmert (1972) entwickelte ein hierarchisches Modell mit den vier Beurteilungsebenen Ausführbarkeit, Erträglichkeit, Zumutbarkeit und Zufriedenheit. Ausführbarkeit beurteilt primär die physische Möglichkeit der Ausübung einer Arbeitsaufgabe und ist zunächst kurzfristig orientiert. Eine langfristige Beurteilung stellt die Ebene der Erträglichkeit dar, wobei hier weiterhin eine naturwissenschaftlich-physiologische Betrachtung vorgenommen wird. Die Zumutbarkeit ergänzt diese um soziale Aspekte, wobei die Empfindung der Zumutbarkeit sich interindividuell unterscheidet und auch von regionalen Aspekten sowie dem gesellschaftlichen Umfeld abhängt. So kann etwa die Entlohnung oder die aktuelle Arbeitsmarktsituation Einfluss auf die Empfindung der Zumutbarkeit ein und derselben Arbeit haben. Die Beurteilung hinsichtlich der Zufriedenheit obliegt allein der subjektiven psychologischen Empfindung der Einzelperson (Schlick, Bruder, & Luczak, 2010). Das Modell von Rohmert wurde vielfach diskutiert und modifiziert, wobei die Grundidee der hierarchischen Betrachtung beibehalten wurde (Hacker, 1986; Luczak, et al., 1989; Ulich, 2011). Ausführbarkeit wird dabei einerseits als Grundanforderung verstanden, welche als solches keine Ebene zur Beurteilung von Arbeit darstellt (vgl. Ulich). Andererseits ist die Ausführbarkeit ein wichtiges Kriterium bei der Arbeitsgestaltung. So kann etwa eine gelegentliche Rüsttätigkeit mit dem Handhaben größerer Lasten verbunden sein, welche bei häufiger Ausführung zu einer Überbelastung führen würde. Eben dies verdeutlicht die Abgrenzung zur Erträglichkeit. Eine Arbeitstätigkeit, die einmalig bzw. kurzzeitig ausführbar ist, kann langfristig ggf. nicht erträglich sein.

Die Forderung nach ergonomischer Arbeitsgestaltung resultiert zunächst aus rechtlichen sowie normativen Vorgaben und stellt somit eine betriebliche Notwendigkeit dar. Die Arbeitsschutzgesetzgebung verlangt die Beurteilung der vorliegenden Gefährdungen sowie entsprechende Maßnahmen zu deren Beherrschung (ArbSchG, §5, 2009).

Es konnten jedoch vielfach auch wirtschaftliche Vorteile aufgrund von guter Ergonomie identifiziert werden (Eberle, Kraemer, & Lück, 2005; Eklund, 1995; Fritzsche, 2010; Hendrick, 1996; Koether, Kurz, Seidel, & Weber, 2001; Schaub & Landau, 2004). Letztlich ist jede ergonomische Maßnahme auch ein Beitrag zum betrieblichen Gesundheitsmanagement. Durch entsprechend gute Arbeitsgestaltung

können sowohl die sachlichen als auch die menschlichen Leistungsvoraussetzungen positiv beeinflusst werden, was sich am Ende auf die Produktivität wie auch die Qualität von Produkten und Prozessen auswirkt (Spanner-Ulmer, 2006).
Um den gesetzlichen Vorgaben nachzukommen und die berichteten Vorteile nutzen zu können, benötigt die Praxis entsprechende Verfahren zur Beurteilung der ergonomischen Gestaltungsgüte. Wie im vorangegangenen Kapitel 2.3.1 erläutert, umfasst eine ganzheitliche ergonomische Gestaltung vielfältige Aspekte. Im Sinne dieser Arbeit wird jedoch vorwiegend auf die physischen Belastungen orientiert, d. h. im Folgenden werden unter dem Begriff Ergonomie die Teilbereiche der anthropometrischen, bewegungstechnischen und physiologischen Arbeitsgestaltung zusammengefasst.

2.3.3 Methoden der Ergonomiebewertung

Die Überprüfung der Erträglichkeit stellt den Hauptanwendungsbereich der ergonomischen Bewertung menschlicher Arbeit dar. Hierfür wurden in Wissenschaft und Praxis vielfältige Methoden entwickelt, die sich sowohl hinsichtlich der überprüften Risikofaktoren als auch in Bezug auf den Anwenderkreis unterscheiden. Luczak (1991) unterscheidet vier Grundtypen von Untersuchungsmethoden: Beobachtung, Befragung, physiologische und physikalisch-chemische Messmethoden. Weiterhin wird differenziert zwischen objektiven, d. h. von außen beurteilenden, und subjektiven, also selbst einschätzenden, Verfahren. Zentrale Klassifizierungsdimensionen der Methoden sind insbesondere die Beurteilungstiefe, die Genauigkeit sowie die Anzahl berücksichtigter Merkmale (Caffier, Steinberg, & Liebers, 1999). Betrachtet man das gesamte, zur Verfügung stehende Methodeninventar, so ergibt sich eine dreistufige Einteilung der Verfahren, welche in Abbildung 4 dargestellt ist (Jürgens, et al., 2001).

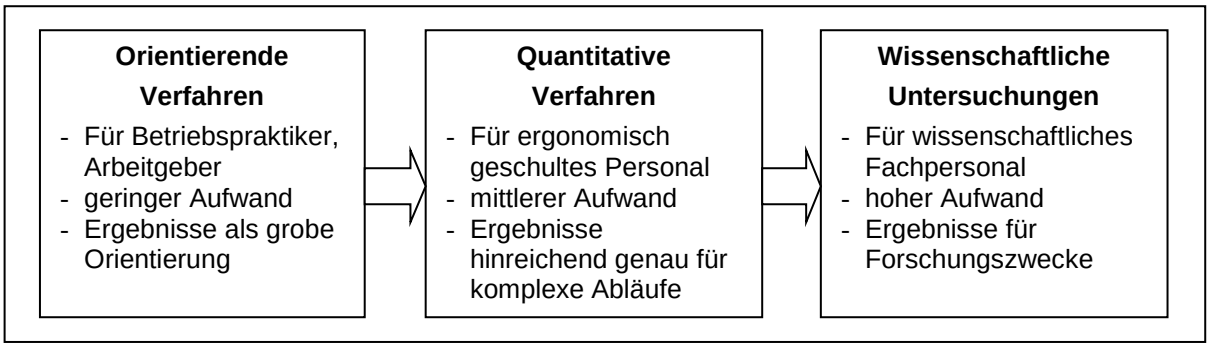


Abbildung 4 - Dreistufige Einteilung der Ergonomiebewertungsverfahren (nach Jürgens et al., 2001)

Orientierende Verfahren sollen bei möglichst geringem Aufwand ausreichend genaue Ergebnisse liefern, um rasch die Belastungen der zu untersuchenden Tätigkeit abschätzen zu können. Sie sollten keine umfangreichen Fachkenntnisse erfordern und für möglichst viele Arbeitsplätze ohne Einschränkungen anwendbar sein.

Weiterhin sollen Ursachen erhöhter Belastungen erkennbar werden. Quantitative Verfahren kommen bei komplexeren Arbeitsabläufen, etwa mit unterschiedlichen Teiltätigkeiten, unklaren Einschätzungen bezüglich der Ausprägung einzelner Belastungsfaktoren oder speziellen Fragestellungen zum Einsatz. Für die Durchführung ist ergonomisch geschultes Personal erforderlich. Verfahren der Stufe 3 sind komplexe Untersuchungen, welche wissenschaftliches Fachpersonal, sensible technische Ausstattung und umfassende Planung erfordern. Hierbei kommen Messungen von Herzfrequenz, Körpertemperatur und weiterer Körperwerte ebenso zum Einsatz wie arbeitspsychologische Verfahren.

Orientierende Methoden erlauben es zwar relativ schnell und ohne umfassendes Fachwissen, vorliegende Risikofaktoren zu ermitteln und zu beurteilen, stoßen aber bei komplexeren Tätigkeiten rasch an ihre Grenzen und sind zur Beurteilung vielschichtiger Belastungssituationen ungeeignet. Wissenschaftliche Untersuchungen hingegen liefern sehr detaillierte Ergebnisse, welche aber nur für die jeweils betrachteten (Labor-)Bedingungen und Personengruppen gültig sind. Zudem ist der Bedarf an Personal, Ausstattung und Zeit zu hoch, um viele Arbeitsplätze zu untersuchen. Auch sind störende Eingriffe in die Arbeitsabläufe kaum zu vermeiden. Aus diesen Gründen haben sich in der Praxis vor allem Verfahren der Stufe 2 durchgesetzt. Einem vertretbaren Zeitaufwand stehen hinreichend genaue Ergebnisse gegenüber, auf deren Basis Arbeitsplätze gestaltet und betriebliche Abläufe geplant werden können.

In der Vergangenheit wurden überwiegend Methoden entwickelt, welche der Berechnung fester Grenzwerte, etwa für Aktionskräfte oder zu handhabende Lasten, dienten (Burandt, 1978; Schultetus, 1980; Waters, Putz-Anderson, & Garg, 1994) oder Dosisbetrachtungen beinhalteten, welche vor allem durch arbeitsmedizinisches Fachpersonal angewandt werden können (Berufsgenossenschftliches Institut für Arbeitsschutz - BGIA, 2005). Aktuelle Verfahren hingegen ermöglichen eine Risikoabschätzung (Steinberg & Windberg, 1994; Jürgens, et al., 2002). Oft fokussieren Verfahren auf ausgewählte Belastungsfaktoren, etwa das NIOSH-Verfahren auf manuelle Lastenhandhabung (Waters, Putz-Anderson, Garg, & Fine, 1993), der montagespezifische Kraftatlas auf zulässige Aktionskräfte (Wakula, et al., 2009), SAK (System zur Analyse von Körperhaltungen) oder OWAS (Ovako Working Posture Analysing System) auf Körperhaltungen (Sämann, 1970; Karhu, Kansi, & Kuorinka, 1977). Andere Methoden wie RULA (Rapid Upper Limb Assessment) oder OCRA (Occupational Risk Assessment) ermöglichen umfassendere Analysen (McAtamney & Corlett, 1993; Colombini, Occhipinti, & Grieco, 2002). Eine vollzählige Darstellung der vorhandenen Methoden ist kaum möglich, so berichtet Lawaczek (2001) von mehr als 130 Methoden allein zur Beurteilung von Körperhaltungen und Bewegungen.

Unter Nutzung der verschiedenen Verfahren entstanden Kombinationsverfahren, welche eine rasche Beurteilung zusammengesetzter Belastungssituationen erlauben. Diese als Screening-Verfahren bezeichneten Methoden wurden für den Einsatz in der industriellen Praxis entwickelt und benötigen eine vergleichsweise kurze Einstufungsdauer. Die Risikobewertung erfolgt anhand eines Drei-Zonen-Modells mit den drei Ampelfarben grün, gelb und rot gemäß DIN EN 614-1 (2009). Die Verfahren sprechen dabei nicht nur Fachpersonal im Arbeitsschutz an sondern vielmehr Fertigungsplaner und Konstrukteure, welche damit frühzeitig überprüfen können, ob ihre Gestaltungslösungen keine überhöhten Belastungen hervorrufen (Schlick, Bruder, & Luczak, 2010). Eine Reihe solcher Screening-Checklisten wurde am Darmstädter Institut für Arbeitswissenschaft (IAD) entwickelt:

- Bewertung körperlicher Arbeit – IAD-BkA (Schaub, Spelten, & Helbig, 2007)
- Bewertung körperlicher Belastungen – IAD-BkB (Ghezel-Ahmadi & Schaub, 2007)
- DesignCheck – DC (Schaub & Winter, 2002)
- New Production Worksheet – NPW (Schaub, Storz, & Landau, 2001; Schaub & Landau, 2004)
- Automotive Assembly Worksheet – AAWS (Schaub K. , 2004)
- European Assembly Worksheet[1] – EAWS (Schaub & Ghezel-Ahmadi, 2007; Schaub, Caragnano, Britzke, & Bruder, 2012)

Die Verfahren ähneln sich und berücksichtigen körperliche Belastungen in Form von Körperhaltungen und -bewegungen, Aktionskräften, Lastenhandhabungen und zusätzliche Belastungen. EAWS umfasst außerdem repetitive Belastungen der oberen Extremitäten. Die Anwendung kann sowohl mitarbeiterorientiert als auch arbeitsplatzbezogen erfolgen. Die IAD-Methoden finden, vor allem dank ihrer raschen Anwendbarkeit, eine weite Verbreitung, insbesondere in der Automobil- und Zulieferindustrie. EAWS ist das MTM-Standard-Ergonomiewerkzeug und wurde in entsprechende Software-Lösungen implementiert (Deutsche MTM-Vereinigung e. V., 2012).

2.3.4 Rechnerunterstützte Verfahren zur Ergonomiebewertung

Im vorangegangenen Abschnitt wurden Verfahren zur Ergonomiebewertung erläutert. Diese sind im Regelfall als Stift-Papier-Methoden konzipiert, d. h. es handelt sich um Bögen oder Tabellen, welche bei der Beobachtung einer Arbeitsausführung ausgefüllt werden. Darüber hinaus wurden jedoch auch Programme entwickelt, welche eine rechnerunterstützte Durchführung der Ergonomiebewertung ermöglichen (Landau, Luczak, & Laurig, 1997; Spanner-Ulmer & Mühlstedt, 2009).

[1] EAWS wird stetig weiterentwickelt, seit Version 1.3.3 (2012) wird EAWS als Ergonomic Assessment Worksheet bezeichnet.

Die Dokumentation von Arbeitsplänen und Zeitanalysen erfolgt ohnehin zumeist rechnerunterstützt mit Hilfe spezieller Software. MTMergonomics (Schaub, Britzke, Sanzenbacher, Jasker, & Landau, 2004; Schlick, Bruder, & Luczak, 2010), ein vom IAD und der Deutschen MTM-Vereinigung entwickeltes System, ermöglicht Ergonomiebetrachtungen auf der Grundlage von MTM-Prozessbausteinen. So können ergonomische Risiken bereits in einer frühen Gestaltungsphase erkannt werden. Zu dieser Zeit ist es noch möglich, Prozesse derart zu verändern, dass ergonomische Mindestanforderungen erfüllt werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass zur Anwendung keine Ergonomieexperten benötigt werden, vielmehr kann die Überprüfung direkt durch den Prozessplaner erfolgen, so dass dieser erkennt, welche technischen oder organisatorischen Gestaltungsmaßnahmen sich in welcher Art und Weise auswirken. Werden Gestaltungsdefizite identifiziert, kann der Planer umgehend reagieren und Verbesserungen entwickeln. Die Ergonomiebewertung erfolgt mit dem EAWS, wobei eine Integration anderer Verfahren möglich ist.

Ein vergleichbares Werkzeug wurde in Schweden von wissenschaftlichen Instituten in Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen, u. a. Volvo, entwickelt. ErgoSAM (Laring, Christmansson, Kadefors, & Örtengren, 2005) ermöglicht es ebenfalls, auf Basis von Zeitanalysen verschiedener MTM-Verdichtungsverfahren einschließlich SAM (Sequence-based activity and method analysis), Untersuchungen zur Ergonomie durchzuführen. Für die Beurteilung werden drei Dimensionen betrachtet: Körperhaltung, Kraft und Zeit. Je nach Kombination der drei Faktoren ergibt sich ein Punktwert zwischen 1 und 27, welcher nach einem Ampelschema beurteilt wird. Die Ausgabe erfolgt in Form eines Diagramms, in welchem die körperliche Belastung über den zeitlichen Verlauf abgetragen wird. So können bedenkliche Teiltätigkeiten leicht identifiziert werden.

Ergonomiebewertung auf Basis von SvZ ermöglicht eine frühzeitige Ergonomiebetrachtung, d. h. der zu erwartenden physischen Belastungen. Neben einem üblicherweise am Arbeitsplatz vorhandenen Computer ist keine weitere Hardware erforderlich. Die Verfahren sind insbesondere für den Einsatz in der Prozessplanung geeignet, da unmittelbar Zusammenhänge zwischen Prozess und Ergonomie erkennbar werden. Jedoch bedarf es ausreichender Kenntnisse im jeweiligen SvZ sowie einer gewissen Vorstellungskraft, da eine Visualisierung der Tätigkeiten nicht erfolgt.

Die Chance, frühzeitig einen Teil der ergonomischen Bedingungen von Arbeitsplätzen zu bewerten bieten auch Virtual bzw. Mixed Reality Technologien (VR/MR, virtuelle bzw. vermischte Realität). In besonderem Maße effektiv ist dabei die Anreicherung von realen Aufbauten durch digitale Daten, sog. Mixed Reality. So können geplante Arbeitsstationen oder Prototypen unter Nutzung alter Produktmodelle, ergänzt um eingeblendete digitale Daten, simuliert werden. Der beispielhaft in Abbildung 5 dargestellte Versuchsaufbau dient der ergonomischen

Untersuchung der Montage des Warndreiecks in die Heckklappe eines Fahrzeugs. Statt des realen Warndreiecks wird ein Ersatzkörper verwendet. Dieser ist mit einem optischen Marker versehen. Über ein Head-Mounted-Display (HMD, am Kopf befestigtes Anzeigegerät) wird auf die jeweilige Position des Ersatzkörpers sein virtuelles Pendant projiziert. Die Testperson befindet sich in einer virtuellen Umgebung und bekommt durch den realen Aufbau haptische Rückmeldungen, was eine realistische Ausführung der Arbeitsumfänge ermöglicht (Engstler, 2006; Naumann & Israel, 2006).

Abbildung 5 - Mixed Reality Szenario einer Fahrzeugmontage-Situation (Jendrusch, 2008)

Um eine rasche Durchführung der Ergonomiebeurteilung zu realisieren, werden durch MoCap die Bewegungsdaten des Probanden aufgenommen (Fritzsche, et al., 2007; Hoffmeyer, 2010). Während dieser den Arbeitsablauf simuliert, werden seine Körperhaltungen über ein Tracking-System erfasst und können anschließend einer teilautomatisierten Analyse unterzogen werden. Hierfür wird der Proband ebenfalls mit entsprechenden Markern versehen.

Da allein die Körperhaltungen erfasst werden, sind darauf basierende Bewertungsverfahren, z. B. OWAS, RULA (vgl. Kapitel 2.3.3), etc. besonders geeignet. Es ist jedoch denkbar, die Haltungsdaten um weitere Belastungsangaben zu ergänzen und damit umfangreichere Analysemethoden, z. B. EAWS, anzuwenden

(Keil, Härtel, Toledo Muñoz, Busche, & Hoffmeyer, 2010). VR/MR-Technologien bieten Möglichkeiten zur frühzeitigen Ergonomieabsicherung. Aufgrund ihrer Vorteile und raschen Entwicklung in den vergangenen Jahren werden sie heute bereits produktiv eingesetzt (Steck, Mosig, Ehler, Hildebrand, & Fritzsche, 2008; Thiemich, 2012). Die Darstellung echter Bewegungen ist ein besonderer Vorteil. Zur Datengewinnung sind jedoch eine umfangreiche technische Ausstattung sowie entsprechend viel Zeit notwendig. Die realistische Darstellung für den Probanden erfordert ausreichend reale Bestandteile und zur umfassenden Bewertung bedarf es weiterer Angaben, so dass die Methode als sehr aufwendig eingeschätzt werden muss. Ferner ist eine nachträgliche Modifikation des erfassten Szenarios nicht möglich, Gestaltungsalternativen müssen erneut aufgebaut und erfasst werden. Möglichkeiten zum Variantenvergleich mit weniger Aufwand sowie zur Ergonomiebetrachtung ohne den Aufbau realer Produkt- und Umgebungsmodelle ermöglichen in Planungs-Software-Lösungen implementierte digitale Menschmodelle (Kapitel 2.4).

2.3.5 Zusammenfassung

Ergonomische Arbeitsgestaltung dient primär der Sicherstellung der Ausführbarkeit, Erträglichkeit und Zumutbarkeit einer Arbeitsaufgabe und zielt somit zunächst auf die Gesunderhaltung der Mitarbeiter. Gleichwohl wirkt sich gute ergonomische Gestaltung auch auf weitere Faktoren wie Qualität aus und dient letztlich auch der Wirtschaftlichkeit.
Zur Beurteilung der ergonomischen Gestaltungsgüte wurden zahlreiche Methoden unterschiedlicher Detaillierung entwickelt. In der Praxis werden heute vermehrt Screening-Verfahren angewandt, welche eine Risikobeurteilung komplexer Belastungssituationen ermöglichen.
Zur Dokumentation der Bewertungsergebnisse wie auch zur Erleichterung der Verfahrensanwendung werden teilweise rechnerunterstützte Systeme eingesetzt.

2.4 Digitale Menschmodelle

2.4.1 Die digitale Fabrik

Beginnend mit der Ablösung des Zeichenbrettes als Konstruktionswerkzeug durch Computer Aided Design Systeme (CAD) wurden seit den 1970er Jahren Computersysteme in allen wesentlichen Bereichen der Planung und Steuerung industrieller Produktion eingeführt. Mit dem Computer Integrated Manufacturing (CIM) entstand in den 1980er Jahren der erste Ansatz eines umfassenden Einsatzes von automatisierter Fertigungssteuerung (Geckler & Rehnelt, 2004). CIM ist geprägt durch eine zentrale Datenbasis und die frühzeitige Verbindung von technischen und betriebswirtschaftlichen Funktionen. Dieser Integrationsgedanke wird durch das in

Abbildung 6 dargestellte Y-Modell verdeutlicht (Scheer, 1987). Grundidee ist es, bereits während der Planung die beiden bislang voneinander getrennten Bereiche technische Entwicklung und betriebswirtschaftliche Produktionsplanung und -steuerung durch die Nutzung einer gemeinsamen Datenbasis miteinander zu verbinden. Diese Verknüpfung wird mit fortschreitendem Reifegrad des Produkts immer enger. Die digitale Fabrik kann dabei nicht nur Planung und Realisierung eines Produktionssystems unterstützen, sondern auch die als Anlauf bezeichnete Übergangsphase (Arnold & Schönherr, 2012).

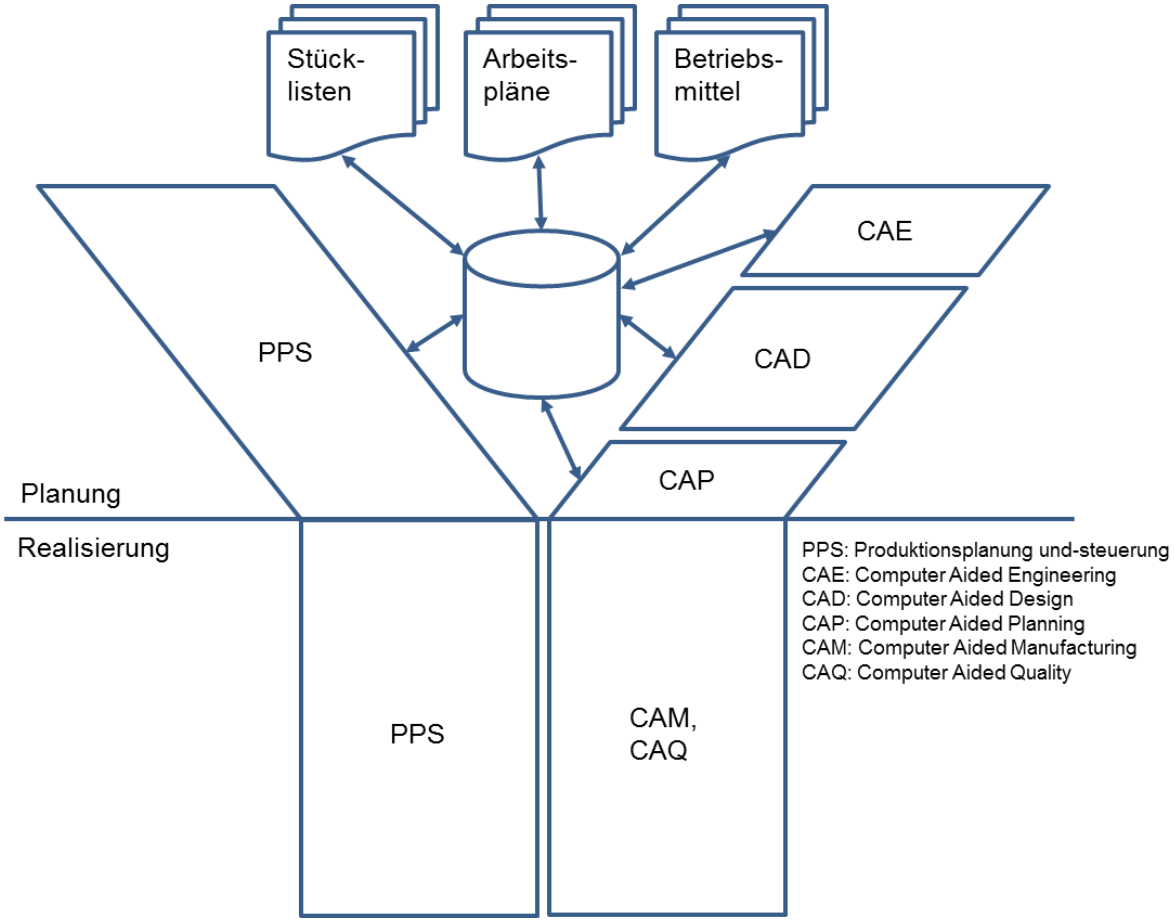


Abbildung 6 - Das Y-CIM-Modell (Scheer, 1987)

In den 1990er Jahren entstanden Simulationssysteme, mit welchen Experimente an digitalen Produkten bzw. Modellen durchgeführt werden konnten, was die Anzahl benötigter realer Prototypen verringerte. Der zunehmende Einsatz von Softwarewerkzeugen führte zur Notwendigkeit, die Verwaltung und Steuerung der entsprechend großen Datenmengen durch integrierte Produktdatenmanagement-Systeme (PDM) abzusichern (Reinhart, Schack, & Müller, 2006).
Das mit Hilfe dieser Werkzeuge entstehende, digitale Abbild der realen Fabrik wie auch die Gesamtheit der Software und Methoden werden als Digitale Fabrik bezeichnet. In der VDI-Richtlinie 4499 (2008) wird die Digitale Fabrik definiert als:

„[…] Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und der dreidimensionalen Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.
Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“

Durch die Darstellung virtueller Produkte und Produktionsanlagen kann im Vorfeld des Serienanlaufes jedes Produktionssystem schneller und besser auf seine Leistungsfähigkeit getestet werden (Fahlbusch, 2001).
Die digitale Fabrikplanung bringt vielfältige Vorteile mit sich, so unterstützt sie etwa die Parallelisierung von Arbeitsschritten, was zu einer schnelleren Produkteinführung führt. Die Aufwandsverschiebung in frühe Planungsphasen, das sog. Frontloading, ermöglicht eine aufwandsarme Bewertung von Gestaltungsvarianten (Bracht, Geckler, & Wenzel, 2011). In Studien konnten Nutzenpotentiale in Zeit, Qualität und Kosten quantifiziert werden (Abbildung 7). Der größte Nutzen ist dabei die Erhöhung der Planungsqualität, welche sich durch eine Reduzierung von Planungsfehlern um bis zu 70% im Gegensatz zu konventioneller Planung ohne Unterstützung der digitalen Fabrik zeigt. Dies spiegelt sich auch in reduzierten Kosten wieder, so lassen sich etwa Investitionskosten um bis zu 10% reduzieren.

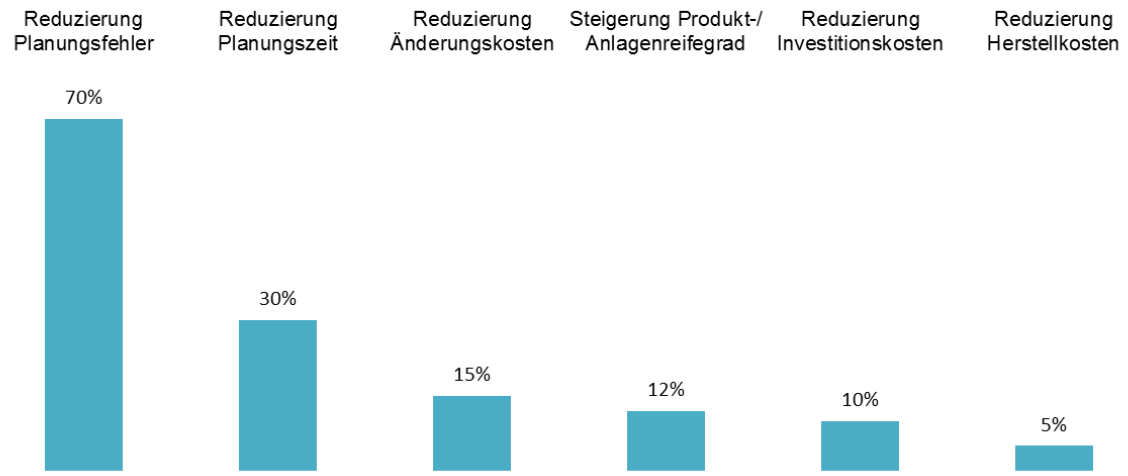


Abbildung 7 - Nutzenpotentiale der Digitalen Fabrik (Bracht & Spillner, 2009)

Der Einsatzbereich der Digitalen Fabrik umfasst die vier Bereiche Produktentwicklung, Fabrik- und Produktionsplanung, Inbetriebnahme und Anlauf der Produktion sowie Produktionsbetrieb und Auftragsmanagement (Kühn, 2006). Die wohl wichtigste Anwendung ist die Simulationstechnik, denn sie erlaubt es, kostengünstig, gefahrlos und mit geringem Aufwand wichtige Erkenntnisse zu gewinnen und unterschiedliche Varianten zu vergleichen. Dabei können die

wesentlichen Aspekte fokussiert und für die Simulation unerhebliche Systembestandteile abstrahiert werden. Ein Anwendungsbereich der Simulation ist die Modellierung personalbezogener Prozesse, beispielsweise zur Abbildung von Gruppenarbeit oder zur Optimierung von Durchlaufzeiten (Verein Deutscher Ingenieure VDI, 2001). Seit den 1960er Jahren werden hierfür digitale Abbilder des Menschen – digitale Menschmodelle – entwickelt.

2.4.2 Historische Entwicklung und wichtige Modelle

Mit der Digitalisierung der Konstruktion mittels CAD einhergehend wurden die bislang genutzten Anthropometrie-Schablonen, z. B. die Kieler Puppe (Deutsches Institut für Normung, 1987), ebenfalls digitalisiert. Neben der Anwendung zur maßlichen Gestaltung galt das Interesse der Entwicklung bereits frühzeitig auch der ergonomischen Bewertung von Körperkräften und Lastenhandhabungen (Chaffin, 1969). Als historisch bedeutende Modelle gelten unter anderen SAMMIE, BoeMan, CyberMan, Anthropos, ERGOMan und SAFEWORK. Übersichtsdarstellungen finden sich beispielsweise bei Chaffin (2001), Mühlstedt et al. (2008), Mühlstedt (2011) oder Duffy (2009).
Bis heute wurden mehr als 150 verschiedene digitale Menschmodelle entwickelt. Getrieben wurde diese Entwicklungen durch Wissenschaft, Industrie und Militär. Dabei entstanden Lösungen für unterschiedlichste Anwendungen, von rein anthropometrischen Darstellungen bis hin zu hybriden Modellen, die detaillierte Vorhersagen zu Muskelbelastungen oder Sitzkomfort erlauben (Landau, 2007). Zu den derzeit wirtschaftlich bedeutenden Modellen zählen insbesondere RAMSIS (Seidl, 1994; Human Solutions, 2012), Human Builder (Fireman & Lesinski, 2009; Dassault Systemes, 2012) sowie Jack (Badler, Phillips, & Webber, 1999; Siemens PLM, 2012), wobei insbesondere die beiden letztgenannten im Rahmen der Prozessergonomie angewandt werden (Fritzsche, 2010; Rodriguez Flick, 2010; Spanner-Ulmer & Mühlstedt, 2010).

2.4.3 Funktionsumfang und Anwendungsgebiete

Die verbreiteten und wirtschaftlich bedeutenden Modelle haben weitgehend gleiche bzw. ähnliche Eigenschaften und Funktionen. Sie bestehen aus einem inneren Skelettmodell und einer umschließenden Hülle, wobei zumeist unterschiedliche anthropometrische Populationen zur Auswahl stehen. So können bspw. Menschmodelle gemäß der späteren Nutzerpopulation mit Körpermaßen aus Europa oder Asien eingesetzt werden. Außerdem lässt sich je nach Gestaltungsaufgabe das Modell mit dem gewünschten Körpergrößenperzentil und Geschlecht auswählen. Darüber hinaus können eigene Maße definiert werden. Abbildung 8 zeigt unterschiedliche Darstellungsformen des Menschmodells Jack. Je nach Bedarf kann das Modell z. B. transparent oder farbig hervorgehoben dargestellt werden

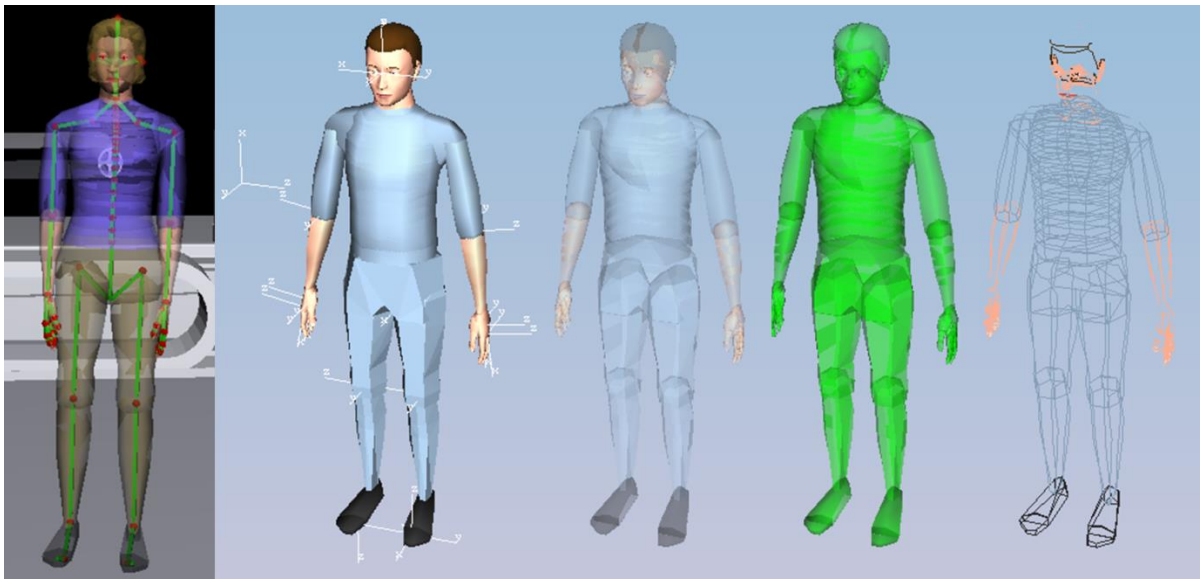


Abbildung 8 - Aufbau und Darstellungsmöglichkeiten digitaler Menschmodelle am Beispiel des Modells Jack

Die Modelle sind entweder direkt in CAD- bzw. PLM-Systeme integriert oder können über Schnittstellen importiert werden.
Sie können derart manipuliert werden, dass gewünschte Posen eingenommen und auch Bewegungsabläufe simuliert werden können. Entsprechend ihrer Eigenschaften erfolgt die Anwendung einerseits im Rahmen der Produktentwicklung, wobei beispielsweise Fahrzeuge entsprechend der anthropometrischen Anforderungen ausgelegt werden. Andererseits dienen digitale Menschmodelle der Prozessgestaltung, indem Abläufe visualisiert und beurteilt werden. Die Nutzung beschränkt sich dabei nicht auf Aufgaben in der Industrie. Anwendungen sind bspw. auch in der Medizin (Seitz, et al., 2004) oder beim Militär (SantosHuman, 2012) zu finden.
Für die Anwendung digitaler Menschmodelle im ergonomischen Gestaltungsprozess wurde die Bezeichnung Ergotyping geprägt als *„Oberbegriff für die Nutzung von Methoden und digitalen Werkzeugen zur Analyse, Bewertung und Gestaltung ergonomischer Aspekte im Digital Prototyping“* (Kamusella & Schmauder, 2009).
Bubb und Fritzsche (2009) unterscheiden hinsichtlich der Anwendungsgebiete fünf Typen digitaler Menschmodelle:

- anthropometrische Modelle,
- biomechanische Modelle,
- Modelle für die Produktionsplanung,
- anatomische Modelle und
- kognitive Modelle.

Darüber hinaus werden insbesondere Absicherung der Instandhaltung wie auch Demonstrations- oder Trainingsmöglichkeiten als Einsatzgebiete beschrieben (Li,

2009). Ein Funktionsschema digitaler Menschmodelle ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Abbildung veranschaulicht die übliche Anwendung eines digitalen Menschmodells. Basis bildet eine Bibliothek unterschiedlicher Modelle sowie die Integration weiterer benötigter Daten, bspw. Werkzeugmodelle. Mittels unterschiedlicher Eingabegeräte können nun die Manipulationsfunktionen zur Untersuchungsdurchführung genutzt werden. Implementierte Ergonomiemethoden dienen anschließend der detaillierten Auswertung. Dokumentation und insbesondere Visualisierung können wiederum mittels unterschiedlicher Ausgabegeräte vorgenommen werden.

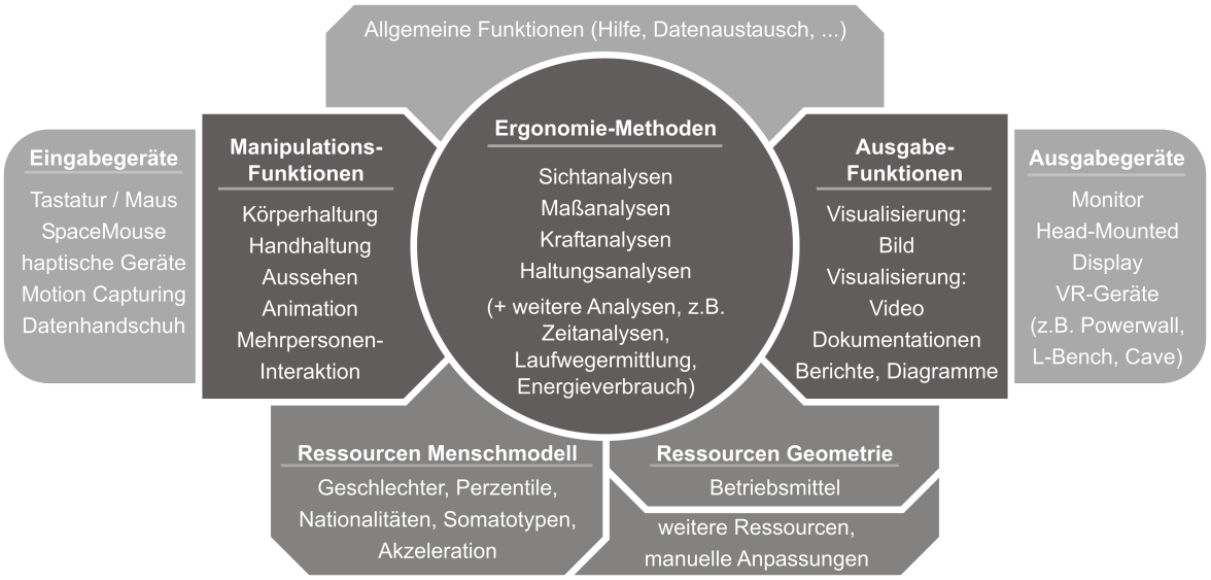


Abbildung 9 - Funktionsschema digitaler Menschmodelle (Mühlstedt & Spanner-Ulmer, 2009)

Neben der reinen Visualisierungsmöglichkeit des Menschmodells beinhalten die Softwarelösungen zusätzliche Möglichkeiten zur Untersuchung von Sicht- und Erreichbarkeit sowie Haltungsanalysen (Abbildung 10). Greifraumvisualisierungen helfen, die Erreichbarkeit von Objekten rasch zu überprüfen. Durch Einfärben werden Vorzugswinkelbereiche einzelner Gelenke visualisiert, ungünstige Gelenkstellungen können so leichter identifiziert werden. Die Darstellung des Sichtfeldes zeigt, ob Aktionsräume einsehbar sind. Erwünschte oder unerwünschte Kollisionen des Menschmodells mit anderen Objekten können ebenso farbig hervorgehen werden.
Darüber hinaus bieten die Programme Standard-Methoden zur ergonomischen Bewertung, beispielsweise von Körperhaltungen oder manuellen Lastenhandhabungen. Grundsätzlich lassen sich vielfältige Ergonomiemethoden implementieren, wobei ggf. zusätzliche manuelle Eingaben erforderlich sind, um eine vollständige Risikobewertung zu ermöglichen (Kamusella & Schmauder, 2010; Kamusella & Ördögh, 2011; Kamusella, 2012).

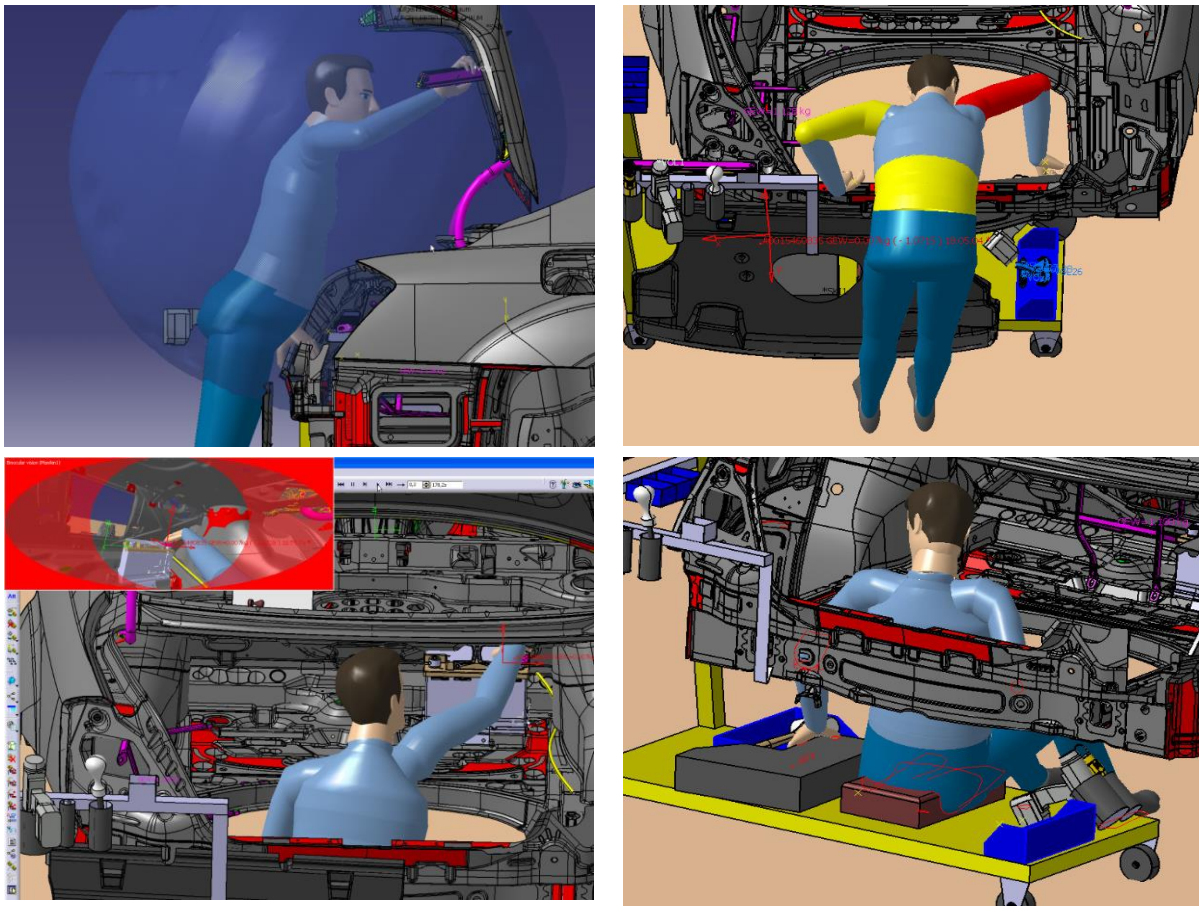


Abbildung 10 - Analysefunktionen für das digitale Menschmodell Human Builder (Jendrusch, 2008)

Hinsichtlich der Softwareergonomie und Benutzerfreundlichkeit lässt sich feststellen, dass es sich bei den digitalen Menschmodellen um Expertensysteme handelt, deren Bedienung einer entsprechenden Einarbeitungszeit bedarf und mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden ist. Insbesondere die Generierung von Bewegungen erweist sich als schwierig und zeitaufwendig.

Im Rahmen einer Befragung von Anwendern digitaler Menschmodelle wurde festgestellt, dass insbesondere bzgl. der Manipulations-Funktionen sehr großer Bedarf an Verbesserung zur Animation der Modelle besteht (Abbildung 11).

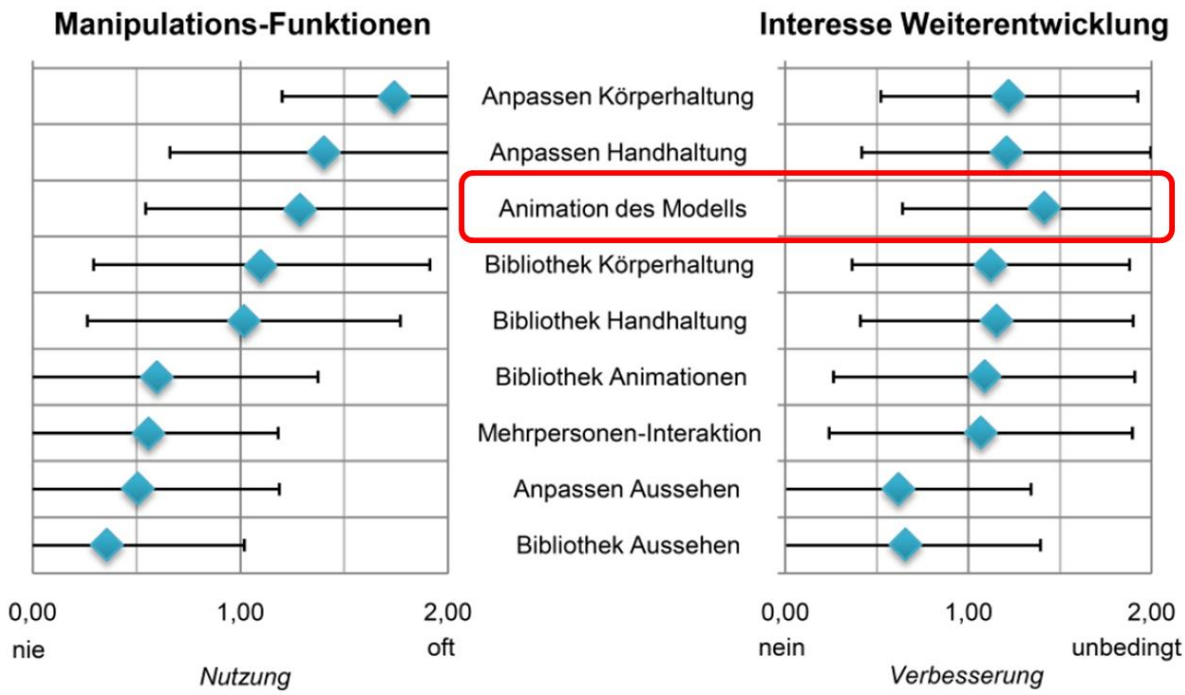


Abbildung 11 - Manipulationsfunktionen digitaler Menschmodelle (Spanner-Ulmer & Mühlstedt, 2010)

Ferner wünschen sich die Anwender Weiterentwicklungen hinsichtlich der Analysefunktionen, besonders zur Beurteilung der Belastungen (Abbildung 12). Dies spiegelt sich auch in einer vergleichsweise seltenen Nutzung solcher Funktionen wider, offensichtlich fehlt es an geeigneten Methoden, welche den praktischen Anforderungen genügen.

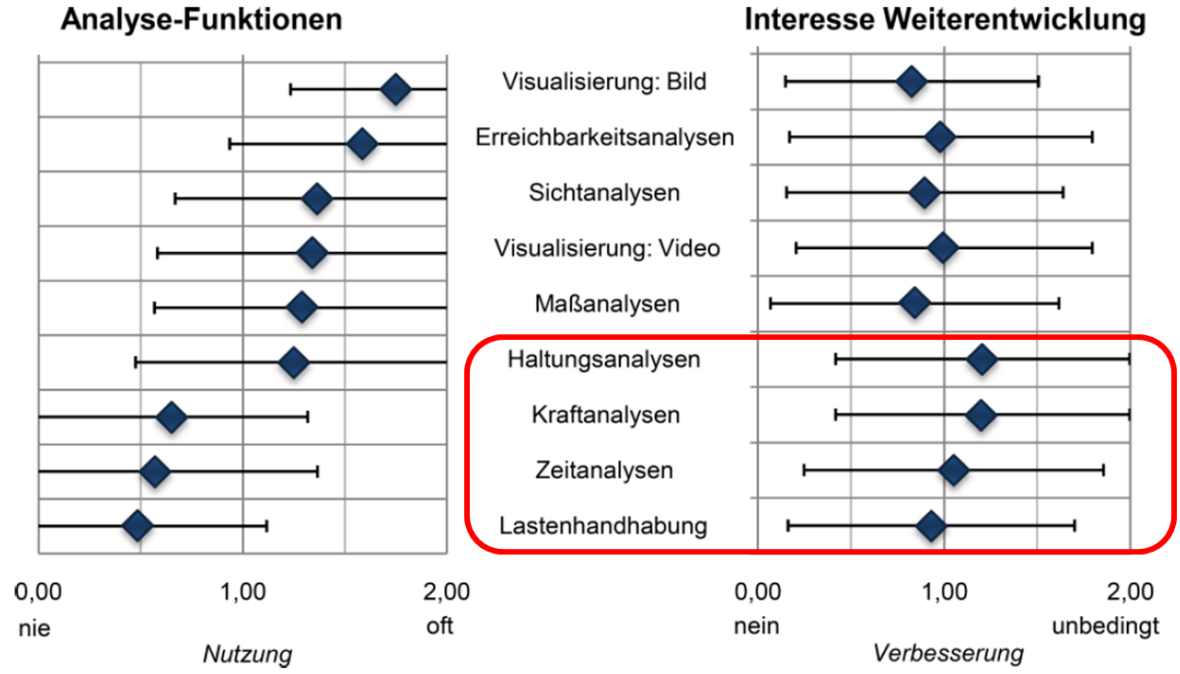


Abbildung 12 - Analysefunktionen digitaler Menschmodelle(Spanner-Ulmer & Mühlstedt, 2010)

Diese Anforderungen aus Sicht der Anwender unterstreichen die Praxisrelevanz der Fragestellungen der vorliegenden Arbeit.
Eine Funktion von besonderer Bedeutung ist die Möglichkeit, Menschmodelle nicht nur statisch anzuwenden, sondern Bewegungsabläufe zu simulieren. Diese wird im folgenden Abschnitt erläutert.

2.4.4 Bewegungsgenerierung für Digitale Menschmodelle

Die Posenerstellung für digitale Menschmodelle ist der Robotik entlehnt. So erfolgt diese weitgehend manuell durch gliedmaßweise Manipulation sämtlicher Gelenkwinkel. Weiterhin ist es in den gängigen Systemen möglich, mittels inverser Kinematik ganze Ketten von Körpersegmenten gleichzeitig zu manipulieren. Problematisch ist, dass die so erzeugten Körperstellungen nicht in jedem Falle realistisch sind bzw. auch biomechanischen Gesetzmäßigkeiten nicht genügen. Um Standard-Posen mit einem möglichst geringen Aufwand erzeugen zu können, wurden Körperhaltungs-Bibliotheken entwickelt.
Zur Bewegungssimulation werden Start- und Endposen modelliert und die zu simulierende Bewegung wird mittels linearer Interpolation zwischen den Posen erzeugt. Dieses als Warping bezeichnete Verfahren führt jedoch nur dann zu glaubhaften Bewegungen, wenn sich Start- und Endpose nicht sehr unterscheiden, insbesondere weil jeweils nur der kürzeste Weg zwischen den Posen generiert wird (Witkin & Popovic, 1995). Die Anzahl der notwendigen, manuell zu erzeugenden Körperstellungen ist dementsprechend hoch.
Ansätze zur Erleichterung und Beschleunigung der Bewegungsmodellierung werden u. a. mit Hilfe von Bewegungsbibliotheken beschrieben (DELMIA, 2007). Daneben werden Lösungen entwickelt, welche eine Bewegungsgenerierung basierend auf einer Tätigkeitsbeschreibung ermöglichen (Raschke, Kuhlmann, & Hollick, 2005).
Studien zeigten, dass die Bewegungen digitaler Menschmodelle auch bei augenscheinlich guten Ergebnissen teilweise stark von der Realität abweichen bzw. dass unbeteiligte Körperteile mitbewegt und beteiligte Körperteile übermäßig stark bewegt werden (Conradi & Alexander, 2008). Korrekte, realgetreue Bewegungen können mittels MoCap auf digitale Menschmodelle übertragen werden (Fritzsche, et al., 2007; Hoffmeyer, 2010).

2.4.5 Zusammenfassung

Die digitale Fabrik ermöglicht eine durchgängige Abbildung betriebswirtschaftlicher und technischer Prozesse während der Planung und Realisierung von Arbeitssystemen. Für die Abbildung manueller Vorgänge wurden digitale Menschmodelle entwickelt. Diese verfügen über diverse Manipulations- und Analysefunktionen. Die etablierten Programme sind weitgehend Expertensysteme, deren Bedienung ausreichend Kenntnisse und Übung verlangt. Die

Bewegungsmodellierung erfolgt vorwiegend manuell mittels Vorwärts- oder inverser Kinematik, sowie mit Hilfe von Bibliotheken oder MoCap. Verbesserungsbedarf besteht insbesondere im Hinblick auf die Animation der Menschmodelle sowie bzgl. der Auswertungsmöglichkeiten, was die Praxisrelevanz der vorliegenden Arbeit unterstreicht.

2.5 Der Produkt-Entstehungs- und Herstellungsprozess

2.5.1 Begriffsbestimmung

Der Produkt-Lebenszyklus beginnt mit der Produkt-Idee und erstreckt sich über Herstellung sowie Verkauf bis hin zum Ende der Produktion des Produkts. Um möglichst effiziente Abläufe zu realisieren, strukturieren Unternehmen ihre dabei auszuführenden Prozesse mit Hilfe definierter Zeiträume und Verantwortlichkeiten (Eigner & Stelzer, 2009).

Das in Form von Zeichnungen und Stücklisten dokumentierte Produkt und alle zur Fertigung benötigten Planungsunterlagen und Ressourcen sind Ergebnisse des Produkt-Entstehungs-Prozesses (PEP). In Bezug auf den Umfang des PEP existieren unterschiedliche Auffassungen. Einerseits werden sowohl Entwicklung als auch Fertigung als Inhalte aufgeführt (Steinhorst, 2005), andererseits werden lediglich die Prozesse vor der Herstellung betrachtet (Motus, 2009). Da vor dem tatsächlichen Start der (Serien-)Produktion im Regelfall Prototypen und Vorserien hergestellt werden, erscheint eine strikte Trennung jedoch nicht sinnvoll. Der PEP schließt sich an den Produkt-Strategie-Prozess an, der die marktgerechte Konzipierung des Produktes beinhaltet. Nach dem PEP beginnt der Produkt-Pflege-Prozess. Während der Serienproduktion werden Modifikationen am Produkt und am Herstellprozess durchgeführt, etwa um Gesetzesänderungen gerecht zu werden, den Absatz durch Aufwertungen am Produkt zu fördern oder die Produktivität zu verbessern. So werden Produktänderungen im Rahmen eines zeitlich verkürzten PEP umgesetzt, da vergleichbare Prozesse auszuführen sind (Spur & Stöferle, 1994).

Der PEP lässt sich wiederum in einzelne Phasen aufteilen, wobei in der Literatur vielfältige Modelle existieren, die letztlich auf ein vergleichbares Konzept, bestehend aus drei bis vier Phasen, zurückzuführen sind (Gausemeier, Plass, & Wenzelmann, 2009; Grote & Feldhusen, 2011; Schenk & Wirth, 2004; Westkämper, 2006; Zäh, 2006). Demnach umfasst der PEP die drei Phasen Produktdefinition, Produktentwicklung und Produktionsentwicklung. Als Endphase des PEP lässt sich der Produktionsanlauf definieren, welcher gleichzeitig die erste Phase des Betriebs bzw. des Produkt-Pflege-Prozesses ist (Abbildung 13).

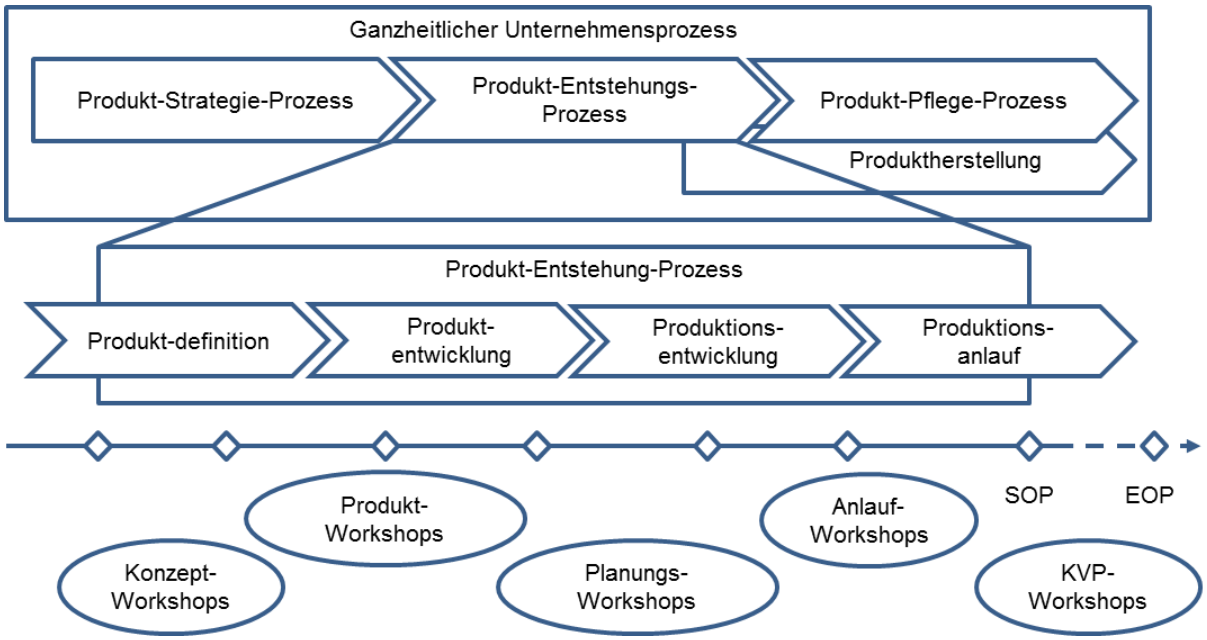


Abbildung 13 - Phasenmodell des Produkt-Entstehungs-Prozesses

Grundsätzlich lassen sich weder die Unternehmens-Teil-Prozesse noch die Phasen des PEP eindeutig voneinander trennen, die Übergänge sind stets fließend.

2.5.2 Phasen des Produkt-Entstehungs-Prozesses

Ausgehend von einer Produkt- oder Geschäftsidee erfolgt die detaillierte Produktdefinition, in der die grundlegenden Spezifikationen des Produkts festgelegt werden. Anhand der Kundenwünsche und der Produktfunktionen erfolgt ein marktorientiertes Zielkostenmanagement indem funktionsabhängige Zielkosten für die Produktkomponenten ermittelt werden (Götze, 2000). Dies bildet die Ausgangsbasis für die weitere Entwicklung des Produkts.
Mit Hilfe von Fehler-Möglichkeits-Einfluss-Analysen (FMEA) werden frühzeitig Fehlerquellen eruiert und somit präventiv vermieden (Brunner & Wagner, 2004).
Ergebnis der Produktentwicklung sind Zeichnungen, digitale und reale Modelle sowie Stücklisten des Produkts.
Während der Produktentwicklung bestehen die größten Möglichkeiten, die späteren Gesamtkosten des Produkts zu beeinflussen, gleichzeitig fallen nur vergleichsweise wenige Kosten an (Abbildung 14). Daher ist es besonders wichtig, Aspekte der fertigungsgerechten Gestaltung wie auch zu erwartende Wartungskosten frühzeitig zu beachten. Die konstruktive Gestaltung der Produkte hat einen erheblichen Einfluss auf die möglichen Fertigungsverfahren, die Automatisierbarkeit oder auch ergonomische Gesichtspunkte im späteren Herstellungsprozess. Art und Anzahl der künftigen Fertigungs- und Montageoperationen hängen entscheidend von der Konstruktion ab (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2004).

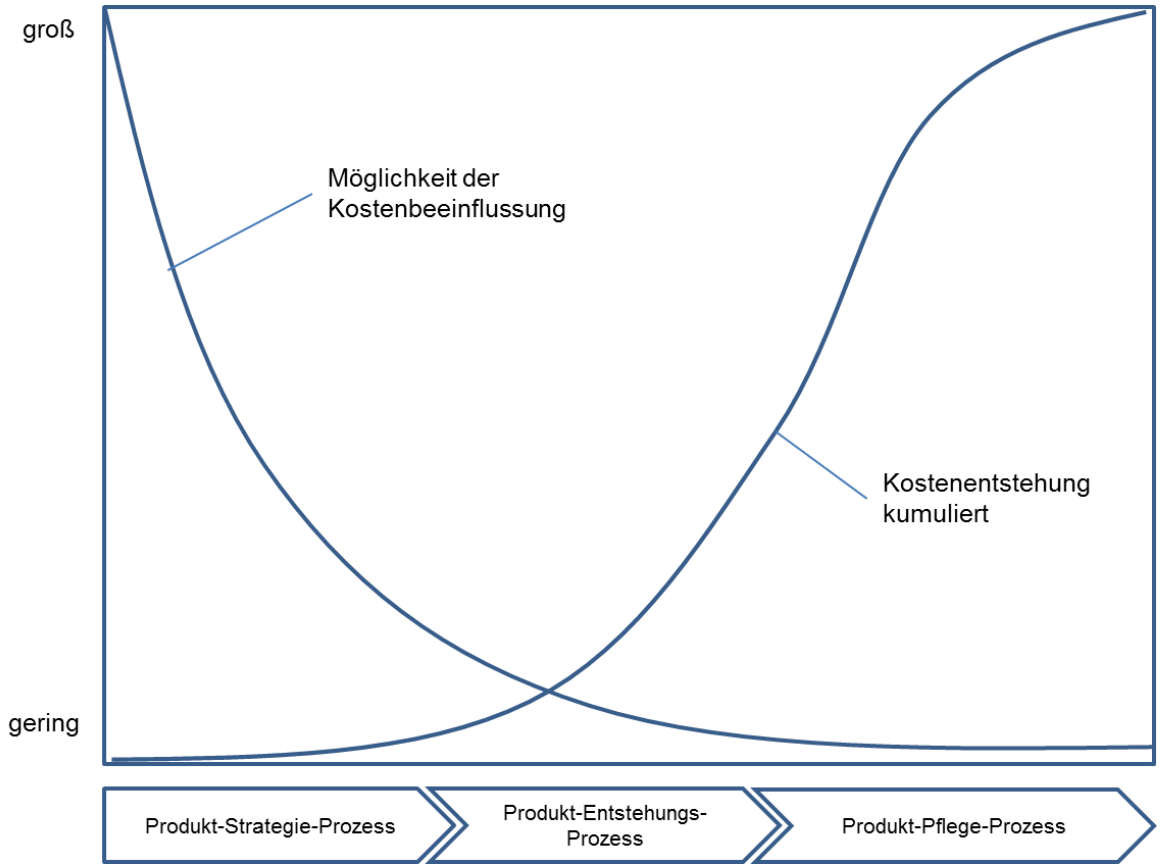


Abbildung 14 - Möglichkeit der Kostenbeeinflussung und Kostenfestlegung während des Produktlebenslaufs (Ehrlenspiel, Kiewert, & Lindemann, 1998)

Neben der Sicherung der Herstellbarkeit wird auch der Umfang an Produktvarianten festgelegt, welcher maßgeblichen Einfluss auf die sich anschließende Phase der Produktionsentwicklung hat.

Im Rahmen der sog. Produkt-Workshops wird in der Automobilindustrie die Baubarkeit, aber auch die wirtschaftliche Gestaltung des Produktes überprüft und optimiert.

Anhand der Ergebnisse der Produktentwicklung wird anschließend während der Produktionsentwicklung bzw. Planung ein Ablauf zur Herstellung entworfen. Dies umfasst u. a. die Erstellung einer technologischen Stückliste, also die Festlegung der Baureihenfolge des Produktes, die Auswahl der Fertigungstechnologien, die Konzipierung des Logistikkonzeptes und die Arbeitsplatzgestaltung. Eine wichtige Einflussgröße ist dabei das geplante Produktionsvolumen, welches sich sowohl auf das grundlegende Herstellkonzept als auch auf die Fertigungsorganisation auswirkt.

Mittels Produktions-Vorbereitungs-Workshops werden, unter Einbeziehung der späteren Belegschaft, die Arbeitsplätze unter wirtschaftlichen und ergonomischen Gesichtspunkten geplant und optimiert.

Im Rahmen von Vorserien wird die Produktion getestet, um die Prozessfähigkeit der Anlagen und Betriebsmittel wie auch die Serienherstellbarkeit des Produktes unter dem Aspekt der Qualitätsanforderungen sicherzustellen (Voigt, 2008).

Mit fortschreitendem Reifegrad der Planung werden größere Stückzahlen unter seriennahen Bedingungen hergestellt, anschließend wird die Serienfreigabe erteilt und es beginnt die Produktion mit dem Start of Production (SOP). Ergebnis ist das erste kundenfähige Produkt (Schneider, 2008).
Ggf. ist vor der Markteinführung des Produktes ein Produktionsvorlauf notwendig, bspw. weil das Produkt Teil einer Baugruppe ist, oder aber um Distributionskanäle zu füllen (Clark & Fujimoto, 1991).
Nach SOP folgt der Produktionshochlauf, d. h. die kontinuierliche Steigerung der produzierten Stückzahl. Dies kann mit einer Umstellung von einem auslaufenden auf das neue Produkt verbunden sein, eine Integration des Produktes in eine bestehende Fertigung umfassen oder eine völlig neue Produktionsanlage betreffen (Näser, 2007; Schneider, 2008). Das Ende des Hochlaufs ist erreicht, wenn fortlaufend die geplante Stückzahl in der entsprechend geforderten Qualität hergestellt wird (Schuh, Stölzle, & Straube, 2008). Dieser stabile Zustand wird als Kammlinie bezeichnet (Grundig, 2009).
Nach dem Erreichen der Kammlinie werden fortlaufend bis zur Einstellung der Produktion (EOP, End of Production) Aktivitäten unternommen, die Produktivität weiter zu verbessern, durch Modifikationen am Herstellprozess, an den Betriebsmitteln und am Produkt. Zentrales Werkzeug ist dabei der Kontinuierliche Verbesserungsprozess (KVP). KVP wird insbesondere im Rahmen von Workshops durchgeführt (Landau, 2007) und dient primär der Produktivitätsverbesserung, schließt aber Maßnahmen zur ergonomischen und sicherheitsgerechten Gestaltung der Arbeitsplätze und -abläufe ebenso mit ein.

2.5.3 Ergonomie im Produkt-Entstehungs- und Herstellungsprozess

Ergonomische Verbesserungen lassen sich im Serienbetrieb in der Regel nur schwer realisieren, weshalb konzeptiver Arbeitsgestaltung große Bedeutung zukommt (Luczak, 1991). Dadurch können mit geringem Aufwand erhebliche Verbesserungen realisiert werden. Um dies zu ermöglichen, sind insbesondere die folgenden Voraussetzungen zu schaffen (Jacob, Toledo Muñoz, Busche, & Jendrusch, 2010):

- Auswahl, Einführung und Verbesserung von Werkzeugen zur Ergonomiebewertung,
- Implementierung von Ergonomie-Meilensteinen in den PEP,
- konsequente und zielgruppenorientierte Qualifizierung der Mitarbeiter aller am PEP beteiligten Organisationseinheiten,
- fähigkeitsgerechter Mitarbeitereinsatz auf Basis eines Ergonomiekatasters (strukturierte Darstellung der Arbeitsplätze eines Bereiches mit den zugehörigen ergonomischen Bewertungen),
- Controlling der Ergonomiemaßnahmen im PEP.

Die Berücksichtigung der Ergonomie in Planung und Serie ist bei vielen Automobilherstellern bereits gängige Praxis (Beck & Frölich, 2010; Hüttmann, 2004; Jacob, Toledo Muñoz, Busche, & Jendrusch, 2010; Unger & Jander, 2010). Die Beurteilung der zu erwartenden Arbeitsbedingungen beginnt zumeist schon drei bis vier Jahre vor dem tatsächlichen Produktionsstart. Bereits zur Produktdefinition werden auf Basis eines Referenzproduktes, zumeist das Vorgängermodell, Optimierungsschwerpunkte identifiziert und Gestaltungsmaßnahmen abgeleitet.

In der Planungsphase werden systematisch Ergonomieuntersuchungen im Rahmen von Produkt-FMEAs durchgeführt. In dieser frühen Phase noch mögliche Produktmodifizierungen helfen, hohe Belastungen, bspw. durch extreme Griffweiten, starke Kraftanwendungen oder ungünstige Körperhaltungen, zu vermeiden. Während der Planungs-Workshops werden Arbeitsprozesse, Werkzeuge und Betriebsmittel bewertet und optimiert. Die Betriebsmittelbeschaffung geht einher mit der gesetzlich vorgeschriebenen Gefährdungsbeurteilung, dabei wird gleichfalls überprüft, ob hinreichend ergonomische Gesichtspunkte berücksichtigt wurden. Im Ergebnis der Planungsphase liegen Ergonomiebewertungen für alle Produkte, Prozesse und Anlagen vor und die Baubarkeit sowie die Einhaltung zulässiger Kraft- und Lastgrenzwerte werden sichergestellt. Mit Beginn der Serienproduktion setzt der kontinuierliche Verbesserungsprozess ein, welcher bis zum Ende des Produktlebenszyklus fortwährende Optimierung auch hinsichtlich der Belastungsreduzierung sicherstellt.

Als Voraussetzung dieser konzeptiven ergonomischen Arbeitsgestaltung ist es unerlässlich, dass die am Prozess beteiligten Mitarbeiter über das entsprechend notwendige ergonomische Fachwissen verfügen, weshalb der Qualifizierung der Planer und später den Betreibern der Produktionsstätten eine wesentliche Rolle zukommt (Spanner-Ulmer & Hensel, 2010).

Die Berücksichtigung der Ergonomie in der Konzept- und Planungsphase ermöglicht es, Produkte und Montageprozesse von Beginn an ergonomisch zu gestalten, geeignete Hilfswerkzeuge auszuwählen und zu entwickeln sowie Logistikprozesse (Linienanstellung) abzustimmen. Der gezielte Einsatz digitaler Planungstools sowie die Berücksichtigung bereits bekannter Problemstellungen in frühen Phasen und später die konsequente ergonomische Begleitung in Anlauf und Serie können in ihrer Kombination eine Verbesserung der Ergonomiesituation bewirken.

Durch die Gestaltung belastungsarmer Arbeitsplätze können oftmals auch Verringerungen der Fertigungszeit realisiert, die Fehlerhäufigkeit reduziert, Einsatzmöglichkeiten für leistungsgewandelte Mitarbeiter geschaffen und die Lohnkosten durch den Entfall von Erschwerniszulagen verringert werden. So führt die durchgängige Ergonomieabsicherung im PEP nicht nur zur Verbesserung der Arbeitsplatzqualität für die Mitarbeiter in der Fertigung sondern auch zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens.

2.5.4 Zusammenfassung

Der Produkt-Entstehungs-Prozess ist eine systematische Beschreibung der Vorgänge, die während der Konzeption, Entwicklung und Realisierung einer Produktidee in Unternehmen durchgeführt werden, einschließlich definierter Meilensteine und zeitlicher Vorgaben. Im PEP werden die Bedingungen der späteren Produktherstellung weitgehend festgelegt, nachträgliche Änderungen sind zumeist schwierig realisierbar und verursachen hohe Kosten. Dies gilt ebenso für die Ergonomie der geplanten Arbeitsplätze. Daher wird in der Automobilindustrie vermehrt die Ergonomie bereits frühzeitig im PEP anhand definierter Meilensteine berücksichtigt. Gemäß der Fragestellungen dieser Arbeit sind neu geschaffene Hilfsmittel zur Ergonomiebetrachtung entsprechend in den PEP einzuordnen.

2.6 Fazit

Die Analyse des aktuellen Wissenstandes der für die vorliegende Arbeit relevanten Fachgebiete macht deutlich, dass im Kontext der aufgezeigten Fragestellungen (siehe Kapitel 1.2) Forschungsbedarf besteht, um digitale Menschsimulationen zu einem praxistauglichen Planungsinstrument zu entwickeln. Dies betrifft die diskutierten Schwerpunkte Vereinfachung der Animation und Anreicherung der Analysefunktionen.
Zur Klärung der zentralen Fragestellungen im Hinblick auf die Bewegungsgenerierung und Ergonomiebewertung mit digitalen Menschmodellen werden die folgenden Hypothesen abgeleitet.

Fragestellung 1, Vereinfachung der Animation:
Hypothese 1:
Der Mensch – im Kontext der Arbeitsgestaltung der geübte Arbeiter – hat eine reproduzierbare, der jeweiligen Verrichtung immanente Motorik. Diese umfasst keine Idealbewegungen und genügt nicht immer den theoretischen Grundlagen der Ergonomie. Es wird angenommen, dass ein erfahrener Arbeiter die Tätigkeiten in einer Weise erledigt, die man als „humanmotorisch richtig“ bezeichnet.

Hypothese 2:
Auf Basis von erfassten Realbewegungen des Menschen lassen sich idealtypische, plausible Bewegungsmuster ableiten und für die Bewegungsgenerierung digitaler Menschmodelle verwenden.

Hypothese 3:
Aus einer Strukturierung menschlicher Arbeit im Sinne der Arbeitsplanung lässt sich eine Semantik für die Bewegungssynthese digitaler Menschmodelle ableiten, wobei

die jeweiligen physiologischen Funktionseinheiten als strukturbildende Elemente verwendet werden können.

Fragestellung 2, Anreicherung der Analysefunktionen:
Hypothese 4:
Das Vorliegen einer vollständigen Ablaufbeschreibung ermöglicht eine weitgehend automatische, mehrere Belastungsfaktoren umfassende Ergonomiebewertung für digitale Menschmodelle, die Kenntnis einzelner Posen ist nicht ausreichend.

Diese Hypothesen dienen als Basis der weiteren Ausarbeitung. Zunächst wird in **Kapitel 3** den Hypothesen 1, 2 und 3 folgend die **Entwicklung einer Methode zur Aufbereitung digital erfasster menschlicher Bewegung für die Bewegungsgenerierung** beschrieben, die als Standard-Geschäftsprozess der Ableitung von Bewegungsalgorithmen für ein digitales Menschmodell dienen soll.
Daraufhin können nunmehr menschliche Bewegungen mittels einer formalen Ablaufbeschreibung und nicht länger als bloße Aneinanderreihung einzelner Posen generiert werden. Dies ermöglicht die in **Kapitel 4** gemäß der Hypothese 4 vorgestellte **Anwendung einer Methode zur Ergonomiebewertung für digitale Menschmodelle**. Die Erkenntnisse flossen in die Entwicklung einer Software zur Simulation und Auswertung menschlicher Bewegung ein. Daher wird in **Kapitel 5** die **Umsetzung der Ergebnisse und Praxisevaluation** dargestellt.

3 Methode zur Aufbereitung digital erfasster menschlicher Bewegung für die Bewegungsgenerierung

Um menschliche Arbeitsvorgänge visuell planen zu können, ist zu untersuchen, wie der Mensch eine Handlungsabsicht in eine konkrete Bewegung umsetzt. Bei der Generierung einzelner Körperhaltungen stellt insbesondere die Mehrdeutigkeit der inversen Kinematik ein Problemfeld dar. Hier muss aus der Vielzahl der theoretisch möglichen Gelenkstellungen eine in der entsprechenden Situation geeignete und plausible Haltung ausgewählt werden. Die zu erzeugenden Bewegungen sollen auf den Betrachter glaubhaft wirken und ergonomischen, biomechanischen sowie zeitwirtschaftlichen Überprüfungen standhalten.

Ausgehend von einer strukturierten Tätigkeitsbeschreibung und einem 3D-Layout soll ein System entworfen werden, welches im Stande ist, aus diesen Eingangsinformationen weitgehend automatisch, anhand weniger einzugebender Parameter, einen situationsbedingt korrekten Bewegungsablauf für ein digitales Menschmodell zu generieren (vgl. Hypothese 3, Kapitel 2.6).

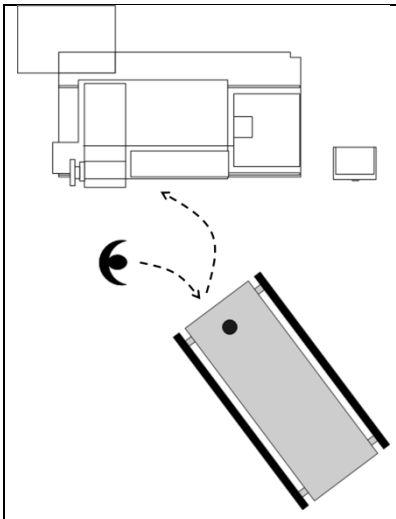
Zur Klärung der Frage, wie ein korrekter Bewegungsablauf für die entsprechende Tätigkeit aussieht, sind mehrere Aspekte relevant. Zunächst gilt es, basierend auf der Umgebungsgeometrie unbeabsichtigte Kollisionen (z. B. Anstoßen des Kopfes an einem Umgebungsobjekt, Durchdringung eines Werkzeugs) zu vermeiden, jedoch beabsichtigte Kollisionen (z. B. Objekt in die Hand nehmen, Füße auf Boden) zu erzeugen. Dabei müssen die handlungsbezogenen Eingangsinformationen in geometriebezogene Informationen konvertiert werden. Weiterhin müssen biomechanische Gesetzmäßigkeiten und Beschränkungen (Freiheitsgrade von Gelenken, maximale Kräfte oder Beschleunigungen) eingehalten werden. Aus der Vielzahl der rein theoretisch biomechanisch korrekten Bewegungen und Posen soll dann eine situationsgebunden möglichst realistische Bewegung ermittelt und visualisiert werden. Die verwendeten Menschmodelle haben zumeist etwa 65 Gelenke mit ein bis drei Freiheitsgraden, so dass bis zu 100 Gelenkwinkel zur Beschreibung einer einzelnen Pose berücksichtigt werden müssen. Ein Industrieroboter hingegen, dessen Bewegungen bereits automatisiert erzeugt werden können, hat in der Regel maximal sieben Achsen, was einen erheblichen Komplexitätsunterschied bedeutet. Um bei der Betrachtung eine flüssige Bewegung wahrnehmen zu können, sind entsprechend viele Zwischenposen notwendig, was neben exakten Zielposen auch einen realistischen Bewegungsverlauf notwendig macht.

Als Basis der Tätigkeitsbeschreibung wird zunächst ein Beschreibungsmodell entwickelt, welches sowohl tätigkeitsabhängige als auch rein bewegungsbezogene Elemente beinhaltet.

Anschließend wird anhand von Bewegungsstudien eine Methodik entwickelt, mit welcher real erfasste Bewegungsdaten in Verrichtungsdaten überführt und anschließend zur Bewegungssynthese aufbereitet werden können.
Erkenntnisse aus diesem Kapitel wurden bereits in Form von Konferenzbeiträgen bzw. Veröffentlichungen in Fachzeitschriften publiziert (Jendrusch & Bauer, 2010; Fritzsche, et al., 2011; Jendrusch, et al., 2011; Leidholdt, Jendrusch, & Fritzsche, 2011).

3.1 Hierarchisches Beschreibungsmodell zur Bewegungssynthese

Um Menschmodelle für Planungsaufgaben effizient anwenden zu können, muss deren Modellierung der Gedankenwelt des Planers entsprechen, d. h. sie darf nicht, wie bislang häufig, im Stile einer Zeichentrickanimation erfolgen. Abbildung 15 verdeutlicht diese unterschiedliche Vorgehensweise.



Planerisch beschriebene Arbeitsaufgabe:
Bauteil von Zuführband entnehmen und in Maschine einlegen

Konventionelle Modellierung des Menschmodells:
Schritt(e) vorwärts → Stehen aufrecht → Beugen → Hände zum Bauteil → Greifen → Hände mit Bauteil zum Körper → Drehung → Schritt(e) vorwärts → Beugen → Hände mit Bauteil zum Ziel → Loslassen → Hände zurück

Abbildung 15 - Notwendige Arbeitsschritte zur Simulation einer Arbeitsaufgabe (Darstellung von oben)

Zur Realisierung dieser Forderung bedarf es einer geeigneten Semantik, die einerseits die notwendigen Eingangsinformationen für die Bewegungen des Menschmodells liefert, andererseits aber der üblichen Denkweise der Planung entspricht. Wie in Kapitel 2.2 aufgezeigt wurde, existieren vielfältige Möglichkeiten zur Gliederung und Strukturierung menschlicher Arbeitstätigkeiten und Bewegungen, die jedoch nur eingeschränkt zur Bewegungssynthese angewandt werden können. Daher wurde im Rahmen des Verbundprojektes eMAN (vgl. Kapitel 1.4) ein neues, hierarchisches Modell, welches sowohl tätigkeitsbezogene als auch tätigkeitsunabhängige Elemente beinhaltet, entwickelt (Bauer, S., 2011). Im Folgenden wird das Modell vorgestellt, da es für die weitere Ausarbeitung eine notwendige Grundlage darstellt. Kernelement dieses Modells ist die komplexe technologische Verrichtung.

3.1.1 Die komplexe technologische Verrichtung

Komplexe technologische Verrichtungen sind Planungselemente, welche der üblichen Gedankenwelt des Planers entsprechen und jeweils fest definierte Arbeitsumfänge umfassen, die mit einer Grundmenge an Parametern ausgestattet sind. Anhand der Parameterbelegung lassen sich die notwendige Vorgabezeit (planmäßige Dauer) wie auch die technisch und humanmotorisch korrekten 3D-Visualisierungsinformationen beschreiben. Typische Verrichtungen sind etwa:

- Werkstück aus Behälter entnehmen und in Vorrichtung einlegen,
- Bauteil mit n Schrauben an Werkstück montieren oder
- in das Fahrzeug einsteigen.

Die in Abbildung 16 dargestellte Szene zeigt die Verrichtung »Setzen Schweißnaht«. Minimal notwendige Parameter für die eindeutige Beschreibung sind:

- Der Werker, also das Menschmodell, für die Ausführung der Verrichtung,
- das Bauteil einschließlich der Schweißnaht als Konstruktionselement in Verbindung mit der Schweißrichtung sowie
- das zu verwendende Werkzeug.

Abbildung 16 - Virtuelle Szene »Setzen Schweißnaht an Teil auf Tisch« (Leidholdt & Bauer, 2009)

Die Verrichtung beinhaltet einen der technologischen Aufgabe immanenten Bewegungsablauf, in diesem Fall das Zuführen der Schweißpistole zum Werkstück, des Bewegen entlang der zu fügenden Schweißnaht und das Absetzen des Werkzeugs nach der Ausführung. Dieser grundlegende Aufbau ist unabhängig vom konkreten Werkstück und wird jeweils an dessen geometrische Gegebenheiten

adaptiert. Diese Kenntnisse werden beim Facharbeiter vorausgesetzt, weshalb im Rahmen der Planung keine weitere Detaillierung erfolgt, allenfalls eine Vorgabezeitermittlung (bspw. Mittels SvZ, vgl. Kapitel 2.2) anhand der Parameter der Verrichtung.

3.1.2 Klassifizierung komplexer Verrichtungen

In Anlehnung an etablierte Verfahren zur Vorgabezeitermittlung, speziell höher verdichtete MTM-Verfahren bzw. dazu gehörige Aufbaustufen, sowie anhand statistischer Auswertungen konkreter Arbeitspläne wurden im Rahmen einer Diplomarbeit typische Verrichtungen ermittelt und kategorisiert (Uhlig, 2008). Im Ergebnis lassen sich zunächst zehn Grundtypen an Verrichtungen identifizieren:

- Aufnehmen, Positionieren, Ablegen,
- Schraubarbeiten,
- Schweißarbeiten,
- Stecken, Clipsen,
- Nieten,
- Klebearbeiten,
- Festspannen, Lösen,
- Maschinen/Anlagen bedienen,
- Körperbewegungen sowie
- Sonstige Verrichtungen.

Diesen grundlegenden Typen liegen jeweils Unterarten zugrunde, die eine weitere Detaillierung ermöglichen und zu einer Verringerung der notwendigen Parameter führen. Dies soll am Beispiel der Schraubarbeiten in Tabelle 3 verdeutlicht werden:

Tabelle 3 - Hierarchische Strukturierung von Schraubarbeiten

Stufe	Beschreibung
1.	**Schraubarbeiten**
1.1.	***Schraubteil handhaben***
1.1.1.	*Stecken und Gang suchen*
1.1.1.1.	Schraubteil ohne/mit festsitzender Unterlegscheibe 2 Turnusse Gang suchen; 1 Hand
1.1.1.2.	Schraubteil ohne/mit festsitzender Unterlegscheibe 2 Turnusse Gang suchen; 2 Hände
1.1.1.3.	Schraubteil mit Unterlegscheibe 2 Turnusse Gang suchen
1.1.1.4.	Schraubteil mit Unterlegscheibe und Zusatzteil 2 Turnusse Gang suchen
1.1.2.	*Stecken und eindrehen*
1.1.2.1.	Schraubteil ohne/mit festsitzender Unterlegscheibe 8 Turnusse eindrehen, 1 Hand
1.1.2.2.	Schraubteil ohne/mit festsitzender Unterlegscheibe 8 Turnusse eindrehen, 2 Hände
1.1.3.	*Weiter eindrehen*
1.1.3.1.	Schraubteil von Hand 1 Turnus weiter ein- oder herausdrehen
1.1.4.	*Handvoll*
1.1.4.1.	Handvoll Schraubteile aufnehmen, Rest abwerfen
1.1.4.2.	aus Handvoll ein Schraubteil mit 2 Turnussen stecken und Gang suchen

Stufe	Beschreibung
1.1.4.3.	aus Handvoll ein Schraubteil in Hilfsmittel platzieren
1.2.	***Hilfsmittel handhaben***
1.2.1.	*Hilfsmittel aufnehmen, auf angefädeltes Schraubteil platzieren, ablegen*
1.2.1.1.	Handmaschinenschrauber aufnehmen, ansetzen, ablegen
1.2.1.2.	Handmaschinenschrauber umsetzen auf weiteres Schraubteil
1.2.1.3.	Drillschrauber aufnehmen, ansetzen, Schraubteil einschrauben, ablegen
1.2.1.4.	Drillschrauber umsetzen auf weiteres Schraubteil, Schraubteil einschrauben
1.2.1.5.	Schraubendreher aufnehmen, ansetzen, Schraubteil einschrauben, ablegen
1.2.1.6.	Schraubendreher umsetzen auf weiteres Schraubteil, Schraubteil einschrauben
1.2.1.7.	Ratsche aufnehmen, ansetzen, Schraubteil einschrauben, ablegen
1.2.1.8.	Ratsche umsetzen auf weiteres Schraubteil, Schraubteil einschrauben
1.2.1.9.	Schraubenschlüssel aufnehmen, ansetzen, Schraubteil einschrauben, ablegen
1.2.1.10.	Schraubenschlüssel umsetzen auf weiteres Schraubteil, Schraubteil einschrauben
1.2.1.11.	Mehrfachschrauber aufnehmen, ansetzen, ablegen
1.2.1.12.	Mehrfachschrauber umsetzen auf weitere Schraubstelle
1.2.2.	*Hilfsmittel aufnehmen, mit eingesetztem Schraubteil ansetzen, ablegen*
1.2.2.1.	Handmaschinenschrauber aufnehmen, mit eingesetztem Schraubteil ansetzen, ablegen
1.2.2.2.	Handmaschinenschrauber umsetzen an weitere Schraubstelle mit eingesetztem Schraubteil
1.2.2.3.	Drillschrauber aufnehmen, mit eingesetztem Schraubteil ansetzen, ablegen
1.2.2.4.	Drillschrauber umsetzen an weitere Schraubstelle mit eingesetztem Schraubteil
1.2.2.5.	Schraubendreher aufnehmen, mit eingesetztem Schraubteil ansetzen, ablegen
1.2.2.6.	Schraubendreher umsetzen an weitere Schraubstelle mit eingesetztem Schraubteil
1.2.3.	*Hilfsmittel zum Gegenhalten aufnehmen, an Schraubstelle plazieren, ablegen*
1.2.3.1.	Werkzeug zum Gegenhalten aufnehmen, ansetzen, ablegen
1.2.3.2.	Werkzeug zum Gegenhalten umsetzen auf weitere Schraubstelle
1.2.4.	*mit Drehmomentschlüssel festziehen*
1.2.4.1.	mit Drehmomentschlüssel festziehen < 30 Nm (ohne Umgreifen)
1.2.4.2.	mit Drehmomentschlüssel umsetzen und festziehen < 30 Nm (ohne Umgreifen)
1.2.4.3.	mit Drehmomentschlüssel festziehen > 30 Nm (mit Umgreifen)
1.2.4.4.	mit Drehmomentschlüssel umsetzen und festziehen > 30 Nm (mit Umgreifen)
1.2.5.	*Schraubereinsatz wechseln*
1.2.5.1.	Schraubereinsatz wechseln

Die Untergliederung in vierter Ebene ergibt bereits 35 verschiedene Verrichtungen, wobei eine weitere, branchen- oder gewerkespezifische Strukturierung möglich ist. Die Beschreibung macht deutlich, dass zwei alternative Möglichkeiten zur Verfügung stehen. Einerseits können bewusst wenige Verrichtungen mit einer Vielzahl inhärenter Parameter definiert werden, dies entspräche etwa der Ebene zwei. Andererseits führt eine gezielte Minimierung an Parametern zu einem Anwachsen der Anzahl verschiedener Verrichtungen, wie bei der vierten Ebene. Beide Möglichkeiten sind letztlich wenig praktikabel, da sie eine Vielzahl an Entscheidungen verlangen. Ist die Verrichtung wenig komplex, bedarf sie nur weniger Parameter und ist anwenderfreundlich. Durch den eingeschränkten Funktionsumfang sind aber sehr viele Verrichtungen insgesamt notwendig, was den Suchaufwand nach der für die Arbeitsaufgabe zutreffenden Verrichtung erhöht. Ist die Verrichtung hingegen hochkomplex, verringert dies die notwendige Gesamtmenge und die passende Verrichtung wird schnell gefunden. Jedoch ist

anschließend eine aufwendige Parameterabfrage zu durchlaufen, um sämtliche mögliche Fälle zu unterscheiden. Um eine, je nach Anwendungsfall bestmögliche Komplexitätsreduzierung zu erreichen, ist eine Kombination mehrerer Ebenen der Verrichtungsstrukturierung notwendig.
Eine weitere Vereinfachung wird über die gezielte Reduktion der Eingabeparameter erzielt, indem Parameter weitgehend automatisiert ermittelt werden (z. B. Greifpunkte, Tragehaltungen, Arbeitspositionen, etc.).

3.1.3 Hierarchisches Ebenenmodell der Verrichtungen und Bewegungen

Die im vorangegangen Kapitel beschriebene Strukturierung orientiert sich an Technologie und Arbeitsaufgabe. Bezogen auf die vom Menschen auszuführenden Tätigkeiten lassen sich verschiedene technologische Abläufe auf gleichartige Ausübungsmuster zurückführen. Diese werden im Weiteren als Elementarverrichtungen bezeichnet. Das folgende Beispiel verdeutlicht diesen Zusammenhang. Die komplexen technologischen Verrichtungen

- Setzen eines Klebepunktes mit Klebepistole,
- Reinigen einer Bohrung mit Druckluftpistole,
- Bohren mit Handbohrmaschine
- Setzen eines Schweißbolzens,
- Anlöten eines Kabels mit Lötpistole sowie
- Verschrauben eines Schraubteils mit Akkuschrauber

lassen sich zunächst allesamt zurückführen auf die Elementarverrichtung
➔ Applizieren eines Pistolenwerkzeuges auf einen Punkt.

Elementarverrichtungen beschreiben technologieunabhängige Bewegungsmuster des gesamten Körpers oder einzelner Körperbereiche des Menschen. Sie bestehen aus einzelnen Bewegungen oder sind eine Kombination mehrerer Teilbewegungen, welche sequenziell oder parallel erfolgen. Diese weitere Zergliederung in grundlegende Bewegungen bildet eine dritte Ebene, welche nunmehr völlig unabhängig von einer spezifischen Tätigkeit ist. Diese Elemente werden in Anlehnung an MTM als Grundbewegungen bezeichnet.
Eine Segmentierung des menschlichen Körpers in einzelne Bereiche führt zu einer überschaubaren Grundmenge an Bewegungsmöglichkeiten, die aus Übergängen zwischen den jeweils möglichen Körperstellungen, den Grundposen, bestehen. Dabei handelt es sich um fünf Bewegungsgruppen (Jendrusch & Bauer, 2010):

- Bewegungen der Beine und Hüfte,
- Bewegungen des Oberkörpers,
- Bewegungen der Arme,
- Bewegungen der Finger und
- Bewegungen des Kopfes.

Die Gesamtheit der damit möglichen Grundbewegungen ist schematisch in Abbildung 17 dargestellt.

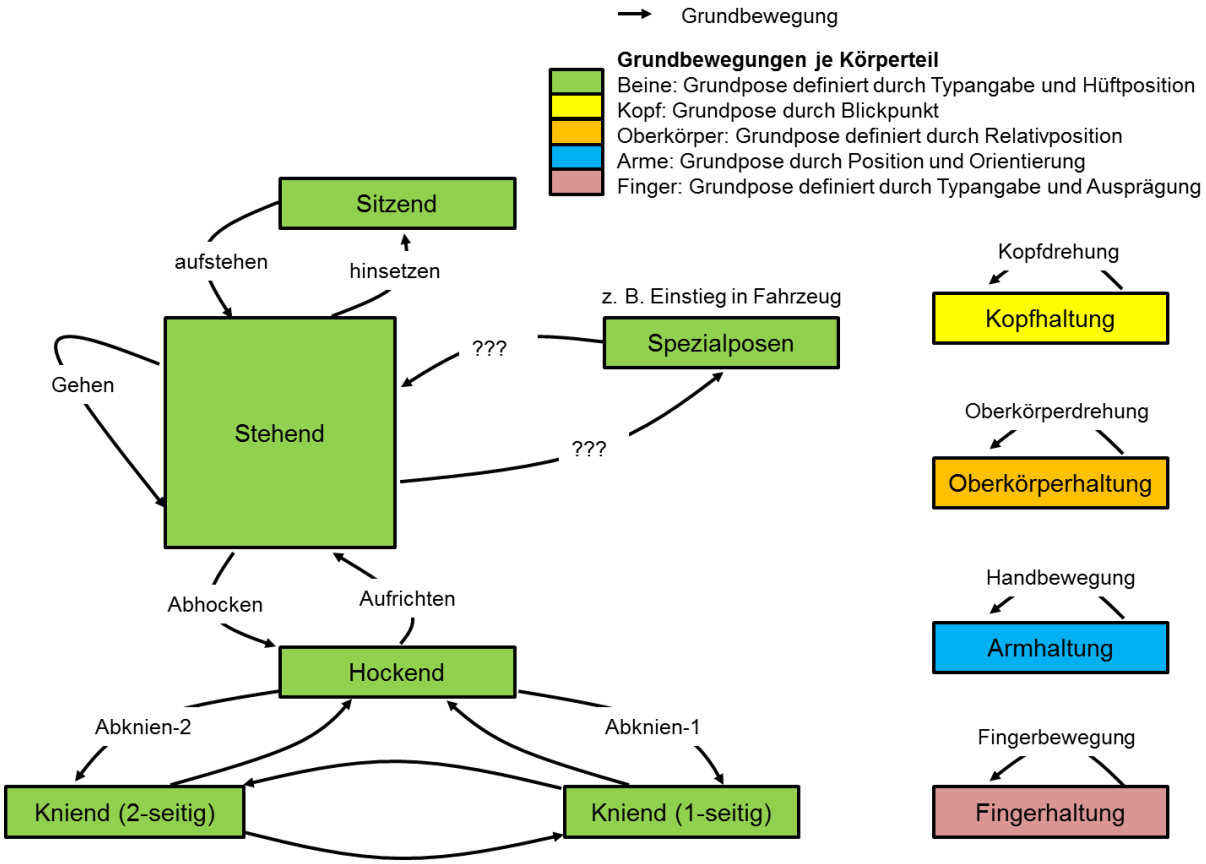


Abbildung 17 - Grundbewegungen eines digitalen Menschmodells (Jendrusch & Bauer, 2010)

Jede Grundpose ist definiert über Parameter zur eindeutigen Typisierung. Bspw. umfasst der Bereich der Grundposen, zwischen denen Beinbewegungen erfolgen, die Ausprägungen Stehen, Hocken, Knien und Sitzen. Diese lassen sich aus der Relativposition der Hüfte zu den Beinen unterscheiden, wobei eine eindeutige Typangabe notwendig ist, vor allem zur Unterscheidung der Posen Knien, Hocken und Sitzen. Hier sind bei gleicher Hüftposition mehrere Posen möglich.

Nicht zwischen allen Posen wurden Bewegungen definiert, da diese ggf. nicht sinnvoll sind. So erfolgt ein möglicher Übergang vom Knien ins Sitzen über die Zwischenposen Hocken und Stehen. Je nach Notwendigkeit lässt sich das Modell erweitern, wie etwa angedeutet um besondere Spezialposen und Bewegungen der Beine, z. B. beim Einsteigen in ein Fahrzeug.

Das gewählte Abstraktionsniveau der Grundbewegungen lässt sich für beliebige Menschmodelle anwenden, unabhängig von der Detailliertheit deren Aufbaus, wobei ggf. eine weitere Segmentierung der Körperpartien denkbar ist, bspw. eine Teilung des Oberkörpers.

Im Ergebnis liegt ein hierarchisches Ordnungsschema vor, welches vier Ebenen unterschiedlicher Komplexität umfasst (Abbildung 18). Zwischen den

Elementarverrichtungen und Grundbewegungen erfolgt der Übergang zwischen einer Tätigkeitsbeschreibung und einer reinen Bewegungsbeschreibung (Leidholdt, Fischer, & Mühlstedt, 2010).

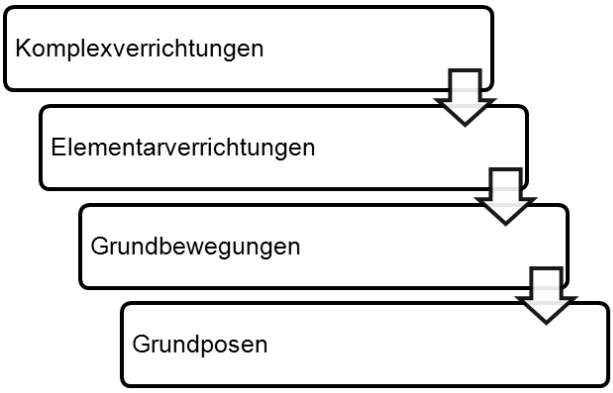


Abbildung 18 - Verrichtungshierarchie mit 4 Ebenen

Der Zweck dieser hierarchischen Strukturierung ist es, später bei der Bewegungsgenerierung mit jeweils minimal notwendiger Beschreibung und möglichst viel algorithmischer Logik unter Ausnutzung technologisch gesetzmäßiger Zusammenhänge möglichst umfangreiche Bewegungen zu generieren.
Dabei setzen sich Elementarbewegungen jeweils aus mehreren der in Abbildung 17 dargestellten Grundbewegungen zusammen. Dabei sind einerseits simultane Bewegungen möglich, etwa gleichzeitige Grundbewegungen von Kopf und Armen, andererseits können die Bewegungen konsekutiv erfolgen, bspw. als eine Folge von Armbewegungen. Das entwickelte Modell erlaubt eine umfassende Mehrfachverwendung gleichartiger Bewegungsmuster und reduziert demzufolge den Umfang des Bewegungsstudiums und die daraus abzuleitende Menge an Algorithmen zur Bewegungssynthese.

Tabelle 4 zeigt den Zusammenhang der Verrichtungshierarchie zu den bekannten Strukturierungsmodellen von MTM und REFA (vgl. Tabelle 2, S. 33) sowie jeweils Beispiele zu den einzelnen Ebenen. Die bekannten Modelle fokussieren ausschließlich auf arbeitsorganisatorische bzw. zeitbestimmende Aspekte und berücksichtigen in ihrer Detaillierung nicht alle für die Bewegungsbeschreibung notwendigen Parameter, weshalb die Entwicklung eines eigenen Modells notwendig war. Es wird deutlich, dass der Umfang sowohl der Komplexverrichtungen als auch der Elementarverrichtungen unterschiedlich groß sein kann. Eine strenge Abgrenzung ist kaum möglich, auch kann eine Elementarverrichtung von längerer Dauer sein als eine Komplexverrichtung. Für die Beschreibung eines Arbeitsablaufes können die Elemente der Verrichtungshierarchie beliebig kombiniert werden, so dass je nach konkreter Aufgabe nur gerade so viele Verrichtungen und Parameter ausgewählt werden müssen, wie es notwendig ist. Außerdem lassen sich grobe wie

auch fein-detaillierte Bewegungen gleichermaßen beschreiben. Der hierarchische Aufbau erfolgt analog der Verfahren zur Soll-Zeit-Bestimmung (vgl. Kapitel 2.2.2), weshalb diese auch für die definierten Verrichtungen angewandt werden können. Das entwickelte Ordnungsschema entspricht somit der üblichen Semantik in der Arbeitsplanung.

Tabelle 4 - Ebenen der Verrichtungshierarchie im Vergleich zu den Strukturierungsmodellen von REFA und MTM

<table>
<tr><th>REFA</th><th>MTM</th><th>Neu:
Verrichtungshierarchie</th><th>Beispiele</th></tr>
<tr><td>Gesamtablauf</td><td rowspan="4"></td><td rowspan="4"></td><td>Herstellung Gesamtfahrzeug</td></tr>
<tr><td>Teilablauf</td><td>Montage Gesamtfahrzeug</td></tr>
<tr><td>Ablaufstufe</td><td>Bandabschnitt Montage Interieur</td></tr>
<tr><td>Vorgang</td><td>ZSB Mittelkonsole montieren</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Teilvorgang</td><td>Arbeitsvorgang</td><td rowspan="2">Komplexverrichtung</td><td>Antenne in Mittelkonsole montieren</td></tr>
<tr><td>Vorgangsfolge</td><td>Mittelkonsole in Vorrichtung einlegen und spannen</td></tr>
<tr><td>Vorgangsschritt</td><td rowspan="3">Elementarverrichtung</td><td>Mittelkonsole in Vorrichtung einlegen</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Vorgangsstufe</td><td>Grundvorgang</td><td>Antenne aus Ladungsträger entnehmen und bereitlegen</td></tr>
<tr><td>Bewegungsfolge</td><td>Antenne aufnehmen</td></tr>
<tr><td>Vorgangselement</td><td>Grundbewegung</td><td>Grundbewegung</td><td>Hinlangen zur Antenne</td></tr>
</table>

3.1.4 Zusammenfassung

Für den Einsatz digitaler Menschmodelle als Planungswerkzeug bedarf es einer Semantik, welche der Gedankenwelt des Planers weitgehend entspricht. Dabei dürfen weder die Anzahl an verfügbaren Elementen noch deren notwendige Parameter ein beherrschbares Maß überschreiten, um die Handhabbarkeit sicherzustellen. Durch ein hierarchisch aufgebautes Ebenenmodell von Arbeitstätigkeiten (Verrichtungen) sowie Körperbewegungen können parametrische Bewegungsbausteine von nahezu beliebigem Umfang und beliebiger Ausprägung realisiert werden. Dies ermöglicht wiederum eine Abbildung der Arbeitsinhalte auf Verfahren zur Soll-Zeitbestimmung sowie die Strukturierung des Bewegungsstudiums.

3.2 Vorüberlegungen zum Bewegungsstudium

Ein Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Entwicklung eines Systems zur Bewegungssynthese (vgl. Kapitel 1.2). In Kapitel 2.6 wurde in Hypothese 1 formuliert, dass es für jede Verrichtung eine für den Menschen typische Ausübung der Bewegung gibt. Dies setzt voraus, dass dabei die folgenden Anforderungen an die zu erzeugenden Bewegungen erfüllt werden müssen:

- Der Ablauf muss plausibel sein. Dies umfasst z. B. die Erreichbarkeit von Objekten oder die Reihenfolge der Tätigkeiten.
- Der Ablauf muss zeitrichtig sein, d. h. die Ablaufdauer muss zeitwirtschaftlichen Grundlagen entsprechen.
- Der Ablauf muss biomechanisch richtig sein, darf also beispielsweise keine Gelenküberdehnung oder Gleichgewichtsverletzung beinhalten.
- Der Ablauf muss humanmotorisch richtig sein. Humanmotorisch bedeutet, dass die Geometrie der menschlichen Posen in ihrer zeitlichen Abfolge (flüssige Bewegung) der Ausführung einer mittelgut geübten und ausreichend eingearbeiteten Person in Abhängigkeit der Anthropometrie, unter normalen, mittleren Bedingungen entspricht. Dies gilt sowohl bei willkürlich erzeugten und zielgerichteten Tätigkeiten als auch bei intuitiv erfolgten Bewegungen infolge von Reflexhandlungen. Im Kontext der Arbeitsgestaltung umfasst das den für die Ausübung eines bestimmten Berufs erforderlichen Bewegungsfundus, wobei das Menschmodell kontext-übliche Bewegungen ausführt, nicht etwa Akrobatik oder ungeschickte Handlungen.

  Humanmotorisch ist also nicht die Idealbewegung, welche etwa im Leistungssport angestrebt wird, sondern die übliche Bewegung, welche nicht zwingend ein Optimum darstellt. Diese Forderung stellt eine große Herausforderung dar, da folglich keine Optimierungsformulierungen bei der Bewegungsbeschreibung angewandt werden können und eine exakte Kenntnis der üblichen Bewegungsausprägung notwendig ist.

Diese Anforderungen sind aufeinander aufbauend, wobei die Plausibilität die Basisvoraussetzung darstellt. Humanmotorische Richtigkeit lässt sich erst erreichen, wenn die Bewegungen zeitrichtig wie auch biomechanisch korrekt sind. Der Zusammenhang zwischen den genannten Anforderungen wird in Abbildung 19 verdeutlicht.

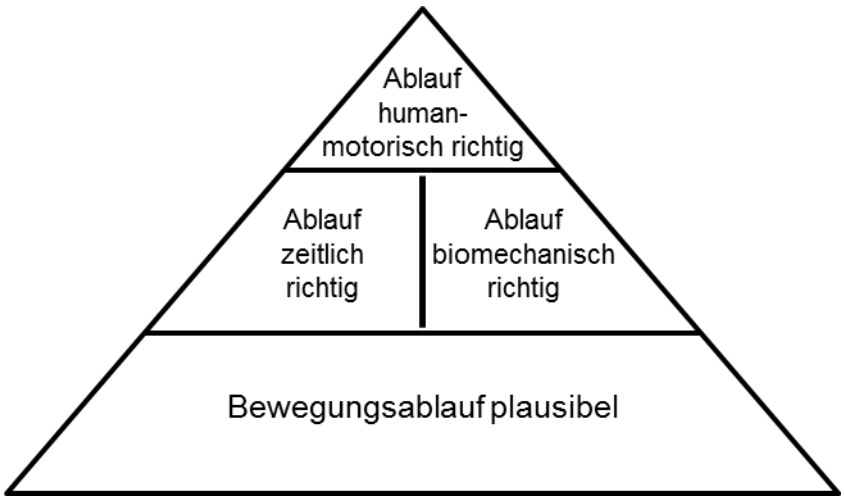


Abbildung 19 - Anforderungen an generierte Bewegungen

Um den beschriebenen Anforderungen genügen zu können, wurde für die Methodenentwicklung zunächst der Untersuchungsbereich eingegrenzt. Anschließend erfolgten Laborversuche zur Identifizierung der relevanten Einflussgrößen. Den Abschluss der Vorüberlegungen bildete die Auswahl bzw. Prüfung eines Systems zur Bewegungserfassung.

3.2.1 Eingrenzung des Untersuchungsbereiches

Im Zuge der Planung von Arbeitssystemen werden arbeitswissenschaftliche Modelle angewandt, um häufig untersuchte Sachverhalte der menschlichen Arbeit abbilden und bewerten zu können, etwa zur Vorgabezeitermittlung oder zur Belastungsbeurteilung. Die Erkenntnisse stammen hauptsächlich aus Beobachtungen und daraus resultierenden Zeitbestimmungen, wobei Posen und Bewegungen zergliedert und mit Parametern belegt werden. Ein denkbarer Ansatz für die Bewegungssynthese ist es daher, invers kinematisch erstellte Bewegungen mittels arbeitswissenschaftlicher Parameter zu korrigieren, indem etwa Erkenntnisse zu Ablaufzeiten oder Vorzugs-Winkelbereichen bei der Kinematik berücksichtigt werden. Dabei entstehen jedoch idealisierte Bewegungsmuster, welche nicht zwingend der üblichen Ausführungsart des Menschen entsprechen (vgl. Hypothese 1, Kapitel 2.6), wodurch Prognosen zu Vorgabezeit und Belastung verfälscht werden. Außerdem ist die biomechanische Korrektheit nicht gewährleistet, sodass Gleichgewichtsbedingungen bspw. nicht eingehalten werden. Derart theoretische Überlegungen eignen sich lediglich zur Vorauswahl der zu betrachtenden Verrichtungen, welche anschließend auf Basis echter menschlicher Bewegungen untersucht werden müssen.
Aufgrund ihrer überschaubaren Anzahl an Parametern erfolgten die Untersuchungen anhand von Elementarverrichtungen. Auf Basis der in den vorangegangenen Kapiteln aufgezeigten Erkenntnisse wurden die folgenden Verrichtungen zur weiteren Untersuchung ausgewählt, wobei davon ausgegangen wurde, dass diese den Großteil üblicher Arbeitstätigkeiten abdecken:

- Elementarverrichtungen des menschlichen Manövrierens im Arbeitsraum (z. B. Setzen, Aufstehen, Laufen, Warten, Wenden),
- Elementarverrichtungen der Handhabung von Objekten (z. B. Aufnehmen, Tragen, Ablegen),
- Elementarverrichtungen zur Handhabung und Applikation von einfachen Werkzeugen (z. B. Pistolenwerkzeug auf Punkt applizieren, Knopf drücken),
- Elementarverrichtungen zur Handhabung an Werkstücken (z. B. Überstreichen einer Fläche, Einschrauben einer Schraube von Hand).

Spezialverrichtungen sowie Filigranarbeiten oder Bewegungen mit besonderer Sorgfalt und Präzision wurden vorerst nicht betrachtet.

3.2.2 Laborversuche

Der in Kapitel 2.6 formulierten Hypothese 2 folgend, lassen sich auf Basis erfasster Realbewegungen Bewegungsmuster ableiten. In einfachen Versuchen wurde daher eine Vielzahl von Verrichtungen mit typischen Objekten experimentell untersucht. Dabei konnten Erkenntnisse zu Bewegungsabläufen und Objekthandhabungen gewonnen sowie die dabei maßgeblichen Einflussgrößen abgeleitet werden. Die Aufzeichnung der Versuche auf Video erleichterte die Auswertung und diente zur Dokumentation der Ergebnisse. Mit Hilfe der Aufzeichnungen ließen sich entsprechende Schlüsselposen identifizieren und Hypothesen zu Bewegungsverläufen ableiten, wie beispielhaft in Abbildung 20 dargestellt ist. Untersucht wurde die Pose beim Entnehmen eines Objektes aus einem Ladungsträger, erhöht oder auf dem Boden stehend. Erkennbar ist bspw., dass zum Erreichen des Objektes zunächst ausschließlich der Oberkörper nach vorn gebeugt wird, bei niedrigerem Lagerpunkt die Beine ergänzend eingesetzt werden und der Rücken zusätzlich gekrümmt wird. Ferner kann der gewählte Abstand zum Ladungsträger abgeschätzt werden.

Abbildung 20 - Laborversuche zum Entnehmen eines Objektes aus einem Ladungsträger erhöht (1) und am Boden (2)

Die Grenzen dieser Versuche liegen in der Auswertbarkeit der Daten. Konkrete Gelenkwinkel und Körperstellungen können nur abgeschätzt werden, weitere Kennzahlen, etwa Geschwindigkeiten, Beschleunigungen oder Kräfte und Momente können den Videos nicht entnommen werden. Jedoch sind Voruntersuchungen zur Ableitung detaillierter Schwerpunkte problemlos und ohne große Voraussetzungen bzgl. der Hardware möglich.

3.2.3 Bewegungserfassung

Für Bewegungsstudien eignen sich Systeme zur digitalen Bewegungserfassung (Kapitel 2.1.4). Da die videogestützte Untersuchung als unzureichend erkannt wurde, diente als Basis der detaillierten Auswertung menschlicher Bewegungen ein Motion Capturing System. Im vorliegenden Projekt wurde das System A.R.T. (Advanced Realtime Tracking, Abbildung 21) verwendet.
A.R.T. basiert auf einem optischen Verfahren unter Verwendung von Markern. Am Probanden werden sogenannte Targets befestigt, die eine Kombination von optischen Markern darstellen. Die Bewegung des Probanden wird von mehreren Infrarot-Kameras aufgezeichnet. Die integrierte Tracking-Software detektiert die Targets in den Bildern der Kameras. Unter Verwendung der Kalibrierungsdaten der Kameras werden aus den Bildkoordinaten Position und Orientierung der Targets im globalen Koordinatensystem für jeden Zeitschritt berechnet. Diese Daten stehen dem Anwender als digitalisierte Bewegungsdaten zur Verfügung.

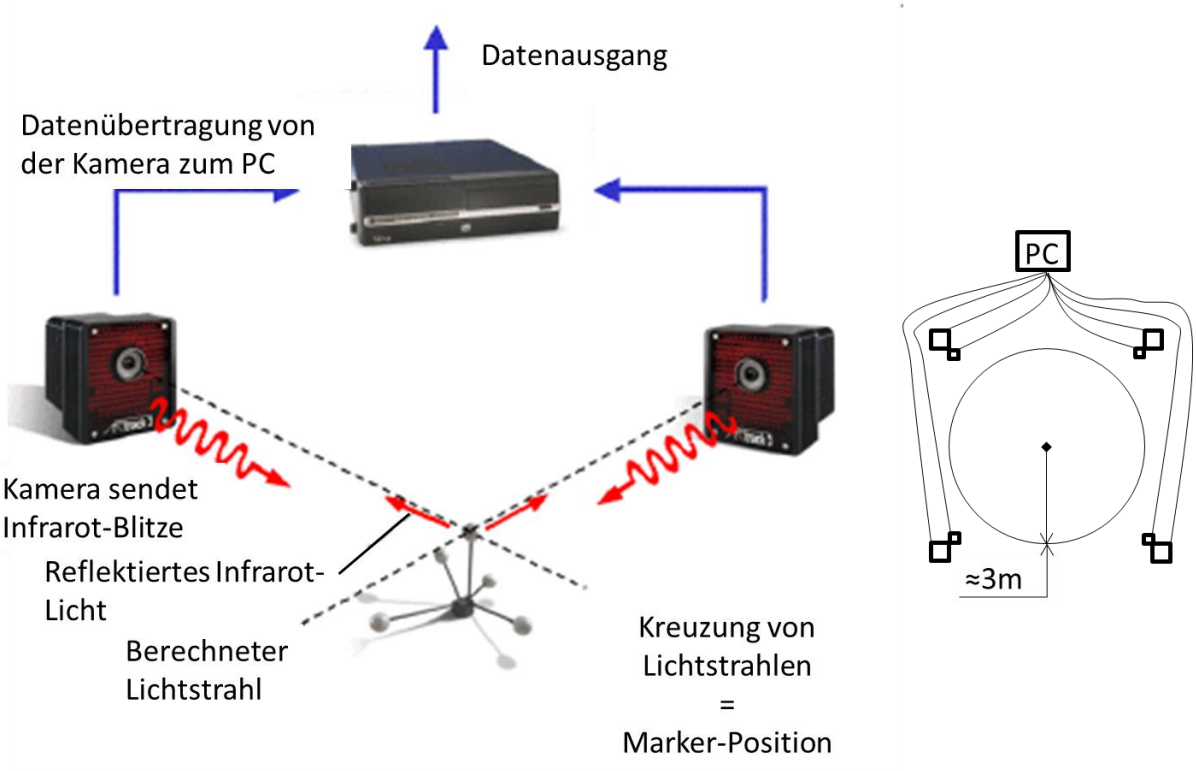


Abbildung 21 - Funktionsprinzip des Motion Capturing Systems A.R.T. (ar-tracking.com, 2012)

3.2.4 Zusammenfassung

Während der Vorüberlegungen konnten zunächst grundlegende Anforderungen an synthetisierte Bewegungen festgelegt werden. Diese müssen demnach plausibel hinsichtlich des Ablaufes, zeitrichtig und biomechanisch korrekt sein, erst dann kann die Humanmotorik realistisch wiedergeben werden.

Der Untersuchungsbereich wurde auf Elementarverrichtungen eingegrenzt, die Identifikation der entsprechenden Parameter erfolgte durch Laborversuche.
Als Methode zur Datengewinnung wurde Motion Capturing ausgewählt, wobei für die Durchführung der nachfolgend beschriebenen Studien das System A.R.T. zur Verfügung stand.

3.3 Studie 1: Motion Capturing unter Laborbedingungen

3.3.1 Untersuchungsgegenstand

Ziel der Untersuchung war es, anhand der Aufnahme feingranular segmentierter Bewegungsabläufe, Gesetzmäßigkeiten zur Ausführung ebendieser zu ermitteln. Zugrunde lag dabei die Annahme, dass die Motorik der menschlichen Bewegungen weitgehend flüssig erfolgt und als mathematische Funktionen dargestellt werden kann, sodass jeder Bewegung Positionsänderungen einzelner Körperteile bzw. Körperteilketten, sowie entsprechende Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zugeordnet werden können.
Im Rahmen der Studie sollten verrichtungstypische Posen wie bspw. die Ausrichtung des Körpers zu einem Wirkpunkt sowie entsprechende Bewegungsmuster einzelner Körpersegmente, welche maßgeblich für die jeweiligen Verrichtungen sind, ermittelt werden.

3.3.2 Stichprobe

Gegenstand der ersten Versuchsserie waren sowohl reine Körperbewegungen als auch Handhabungen von Objekten sowie von Werkzeugen. Durch stufenweise Variation hinsichtlich der Belastung (Gewicht von Gegenständen) und auch in Bezug auf die geometrische Anordnung (Applikationslage) wurden letztlich insgesamt 54 unterschiedliche Verrichtungen aufgenommen (Anlage 1).
Für die Durchführung der Verrichtungen wurden drei Probanden ausgewählt, die sich in der Größe stark unterscheiden (Abbildung 22). Dies erfolgte mit Hinblick auf Fragestellungen zur Abhängigkeit der Bewegungsabläufe von anthropometrischen Daten der Testpersonen. Zwei Versuchspersonen waren männlich, eine weiblich.
Sämtliche Verrichtungen wurden zunächst rechtshändig konzipiert, da diese für den Großteil der Menschen (ca. 90%) die dominante Hand darstellt (Wirth & Liphardt, 1999).

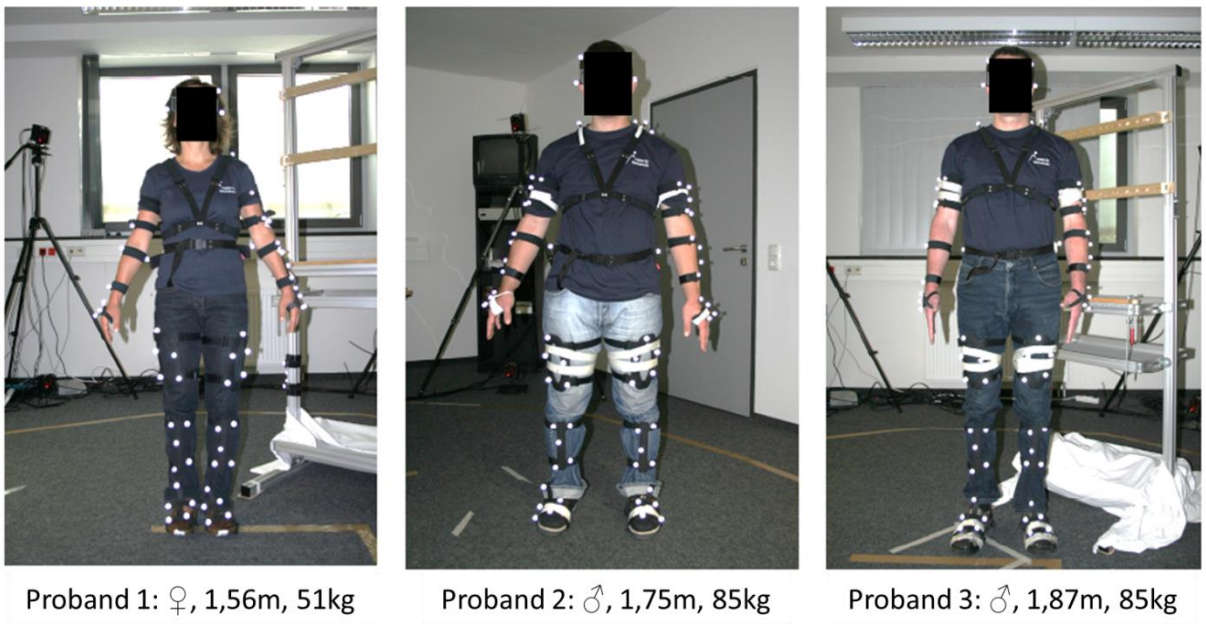


Abbildung 22 - Probanden Motion Capture Studie 1 mit Markern der Firma A.R.T.

3.3.3 Versuchsdesign

Die Verrichtungen wurden unter Laborbedingungen an einem flexiblen Demonstrations-Arbeitsplatz durchgeführt. Der Arbeitsplatz befand sich in der Raummitte, umgeben von acht Tracking-Kameras des Motion Capture Systems. Der Aktionsraum umfasste dabei eine Fläche von etwa 2 x 2 Metern. (Abbildung 23).

Abbildung 23 - Versuchsaufbau Motion Capture Studie 1

Alle Probanden wurden mit je 17 Targets versehen. Die Targets wurden so angeordnet, dass sie die Bewegung des Probanden bestmöglich wiedergeben. Die

Position und Orientierung der Targets in Verbindung mit den anthropometrischen Daten der Probanden dienten als Ausgangsbasis zur Berechnung der entsprechenden Gelenkwinkel. Zunächst musste dazu ein digitales Modell anhand der Anthropometrie des Probanden generiert sowie anschließend die Position der Targets definiert werden. Mittels inverser Kinematik ließen sich daraus dann die Gelenkwinkel ermitteln. Die digital erfassten Daten wurden auf das Menschmodell Dynamicus (Institut für Mechatronik e. V., 2009; 2012) übertragen (Abbildung 24).

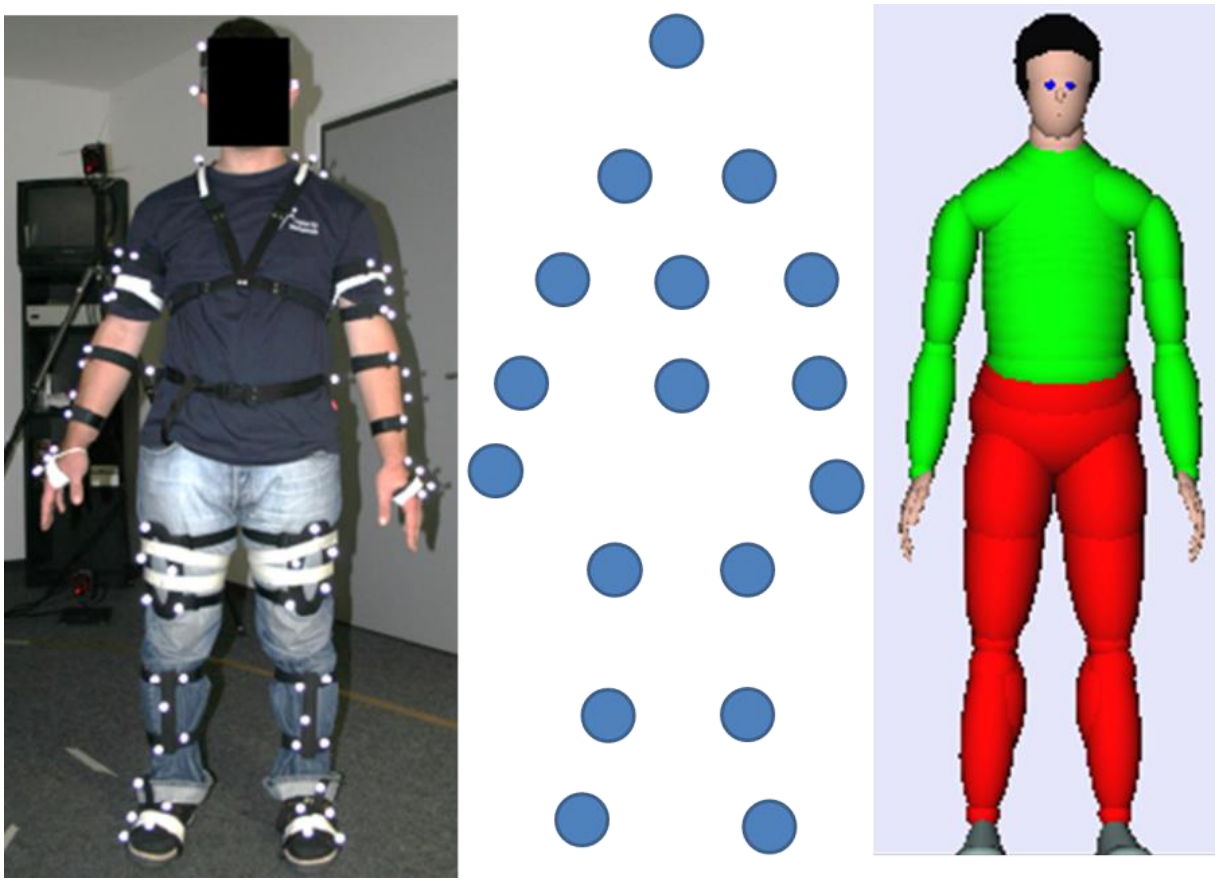


Abbildung 24 - Schematische Darstellung der Übertragung der 17 Targets auf das digitale Menschmodell

Die Bandbreite der 54 Verrichtungen umfasste:

- 4 Körperbewegungen,
- 22 Umsetzvorgänge,
- 3 Werkstückhandhabungen,
- 17 Werkzeughandhabungen und
- 8 Medienapplikationen.

Die Verrichtungen wurden von den Probanden jeweils dreimal hintereinander ausgeführt. Die Versuche wurden mit Hilfe der folgenden Objekte durchgeführt:

- Hocker mit variabler Sitzhöhe,
- Schraubendreher,
- Akkuschrauber,

- Schraubenschlüssel,
- Drehmomentschlüssel,
- Hammer,
- Pinsel,
- Farbroller,
- Kleinladungsträger,
- Hantel sowie
- Schrauben, Gewindebuchsen, Nägel und Brett für Nägel.

Neben den Körperbewegungen wurden auch die Bewegungen der Werkzeuge und sonstigen Arbeitsgegenstände erfasst.

3.3.4 Ergebnisse

Zur Auswertung stand eine Spezialsoftware – „Ergo-Tool“ (Anlage 3) – zur Visualisierung der aufgenommenen Daten zur Verfügung, in welcher die Bewegungssequenzen auf digitale Abbilder der Probanden übertragen wurden. Zur Darstellung diente das Menschmodell Dynamicus, ein AddOn zum Mehrkörper-Simulations-Werkzeug alaska (Institut für Mechatronik e. V., 2009). Die Probanden wurden anthropometrisch vermessen und mit ihren Daten individuell im Modell abgebildet.

Außerdem lagen die erfassten Gelenkwinkel im Zeitverlauf in tabellarischer Form vor. Bereits die bloße Visualisierung verdeutlicht die Auswirkung der jeweiligen Variablen auf die resultierende Bewegung. Abbildung 25 macht die Auswirkung des Gewichts eines zu handhabenden Objektes auf die Form des Bückens deutlich, mit zunehmendem Gewicht erfolgt das Beugen mittels der Beine und weniger über den Rumpf.

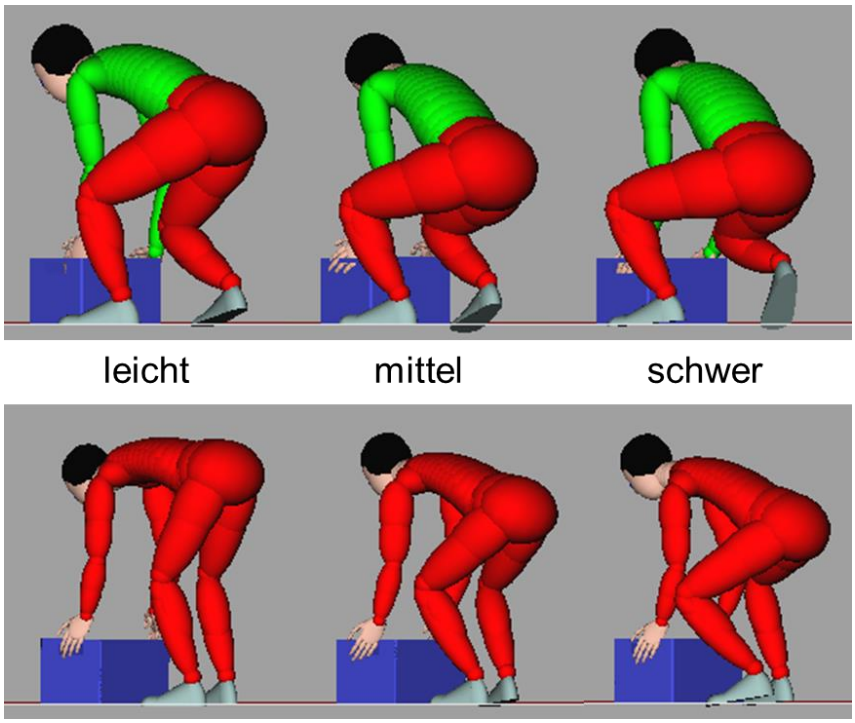


Abbildung 25 - Auswirkung des Lastgewichtes auf die Körperhaltung beim Aufnehmen der Last (links: leicht, rechts: schwer)

Weiterhin können mit Hilfe der Visualisierung komplexe Abläufe in einzelne Teilbewegungen zergliedert werden, bspw. die Handhabung eines Akkuschraubers in die folgenden Schritte (Abbildung 26):

1. Gehen zum Arbeitsplatz,
2. Hinlangen zum Schrauber,
3. Aufnehmen des Schraubers,
4. Schraubteil an Schrauber ansetzen,
5. Schraubteil an Verwendungsstelle ansetzen.

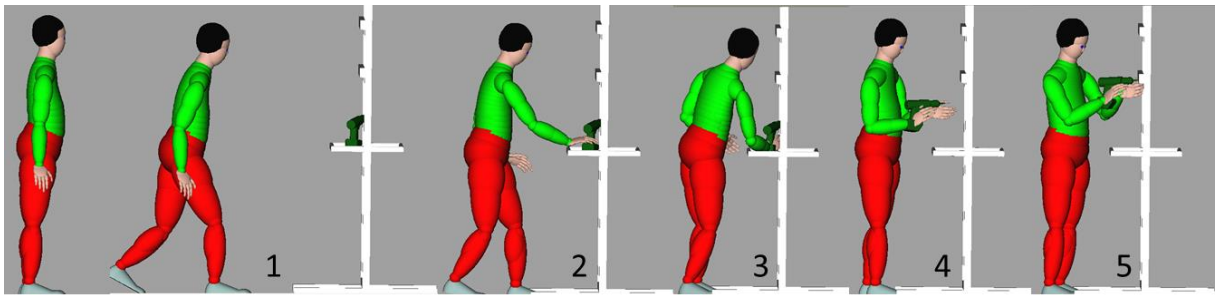


Abbildung 26 - Ausgewählte Einzelbilder zur Darstellung des Ablaufs der Verrichtung "Handhabung Akkuschrauber"

Die graphische Darstellung des zeitlichen Gelenkwinkelverlaufs zeigt die wiederkehrenden Bewegungsmuster bei der mehrmaligen Wiederholung der Verrichtungen. In Abbildung 27 ist exemplarisch der Verlauf des rechten Ellbogengelenkes dargestellt. Daraus lässt sich ableiten, dass es mathematisch

beschreibbare, verrichtungsimmanente Gelenkwinkelfunktionen gibt, die zur parameterabhängigen Bewegungsbeschreibung und -vorhersage genutzt werden können.

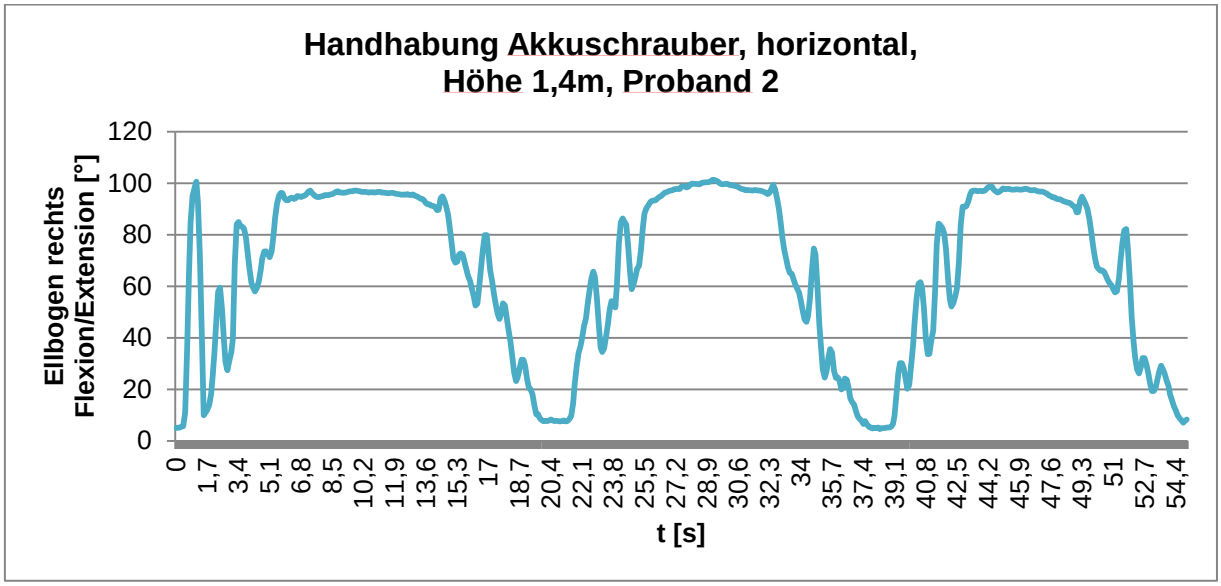


Abbildung 27 - Graphische Darstellung des Gelenkverlaufs am Beispiel des rechten Ellbogens während der Verrichtung "Handhabung Akkuschrauber"

In Abbildung 28 sind die vier für die Zuführbewegung des Werkzeugs zum Wirkpunkt relevanten Freiheitsgrade des rechten Arms während der Verrichtung „Anwendung Akkuschrauber mit Pistolengriff, Höhe 1,4m, horizontal“ dargestellt. Die Flexion im Schultergelenk dient dem Nachvornstrecken des Arms, wobei erkennbar ist, dass der kleinste Proband die deutlichste Streckung benötigt. Unterschiede sind auch im seitlichen Abspreizend des Arms zu sehen, Proband 3 (groß) nimmt mit ausgeprägter Abduktion eine andere Haltung ein als die beiden anderen Probanden. Eine Rotation des Armes erfolgt kaum, ebenso wird der Gelenkwinkel im Ellbogen kaum verändert.
Der Vergleich der Gelenkwinkelverläufe zwischen den Wiederholungen der Verrichtungen einerseits und zwischen den drei Probanden andererseits zeigt, dass typische, wiederkehrende Muster identifiziert werden können und dass es jeweils Gelenkwinkel gibt, die während einer Teilbewegung verändert werden, während andere nahezu unverändert bleiben und folglich bei der Bewegungssynthese vernachlässigt werden können. Es ist erkenntlich, dass die Bewegungen von Proband 3 nahezu gleichartig erfolgen, während bei Proband 2 eine leichte und bei Proband 1 eine deutliche Streuung zu erkennen ist. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Probanden 1 und 2 nicht über die notwendige Übung in der Werkzeuganwendung verfügen.

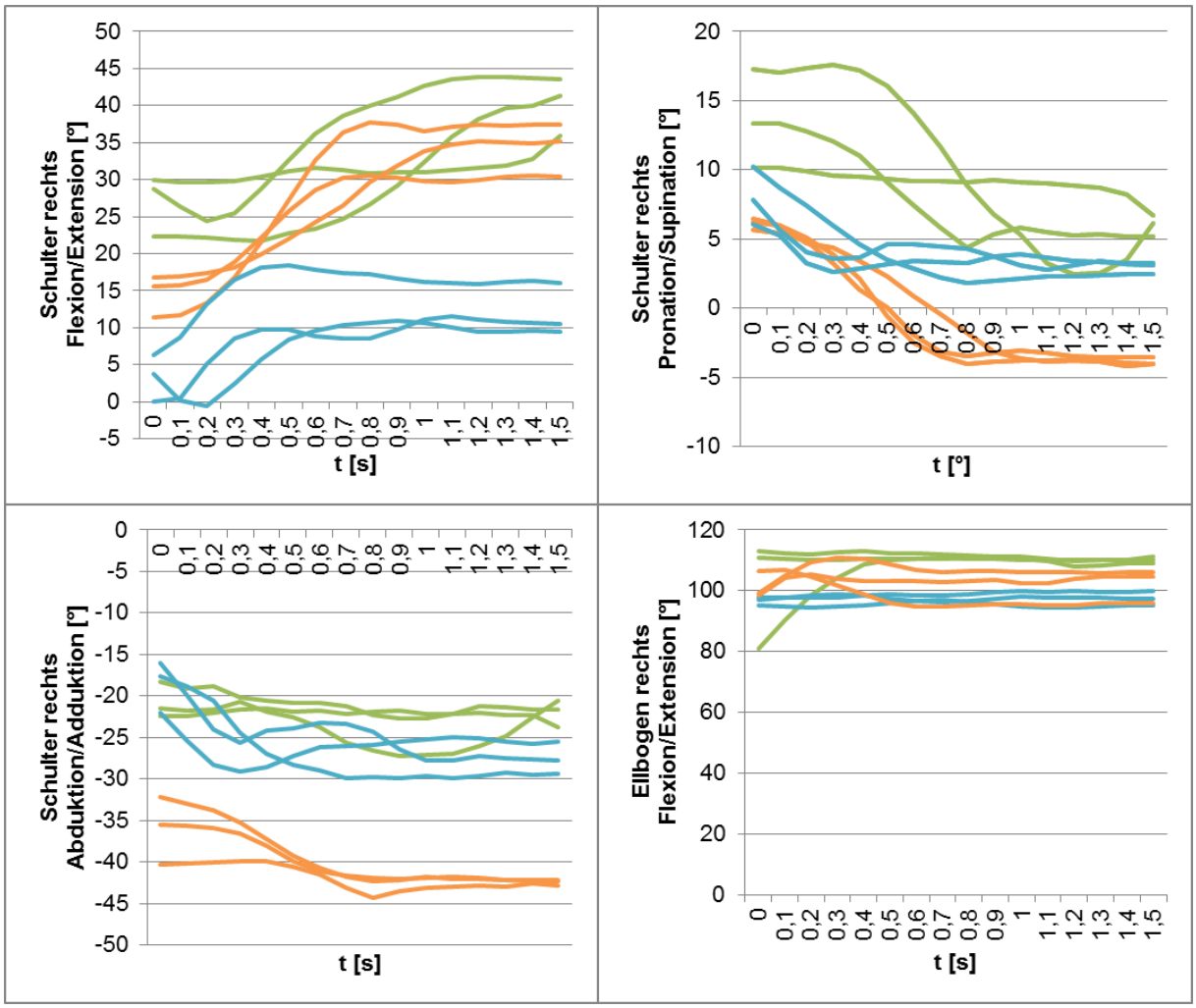


Abbildung 28 - Vergleichende graphische Darstellung der Gelenkverläufe der drei Probanden für die Verrichtung "Handhabung Akkuschrauber": grün = Proband 1 (klein); blau = Proband 2 (mittel); orange = Proband 3 (groß)

Die Darstellung weist für die Bewegungen der drei Probanden vergleichbare Bewegungsverläufe auf, was auf die Richtigkeit der Hypothese, dass es typische, verrichtungsimmanente Bewegungsmuster gibt, hindeutet (vgl. Kapitel 2.6). Jedoch unterscheiden sich die Absolutwerte der Gelenkwinkel, was durch die Abhängigkeit der Bewegung von der relativen Lage des Wirkpunktes zum Menschen erklärt werden kann.

Bezüglich der Grundausrichtung des Körpers zum Wirkpunkt während der Ausführung einer Verrichtung konnten interindividuelle Unterschiede beobachtet, dennoch aber ein grundlegender Typus identifiziert werden (Abbildung 29). Deutlich wird, dass die Probanden eine Schrittstellung einnehmen und der Schultergürtel nicht frontal sondern etwa 30° zum Wirkpunkt verdreht ist.

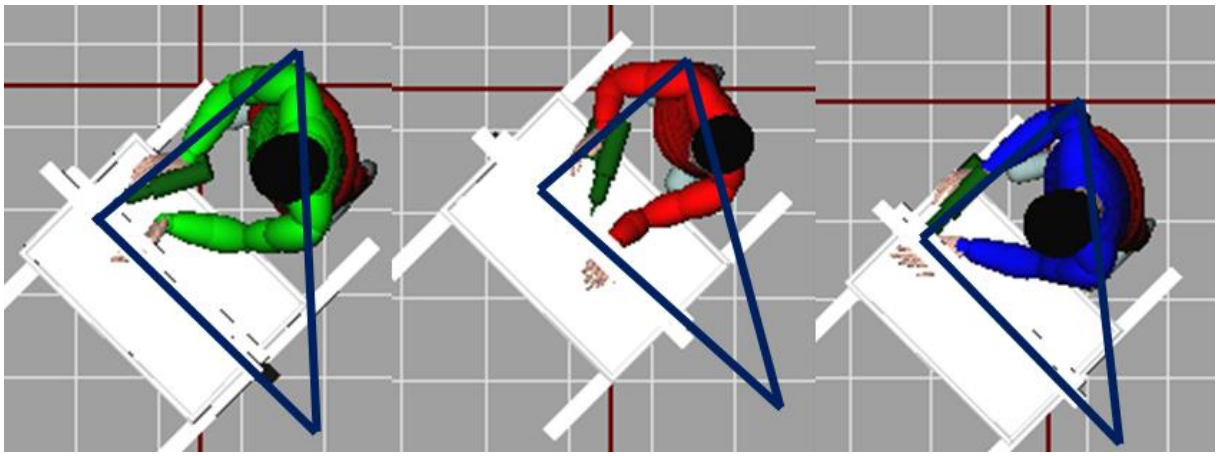


Abbildung 29 - Ausrichtung der drei Probanden zum Wirkpunkt während der "Handhabung Akkuschrauber"

Die im Rahmen der Studie gewonnenen Daten wurden aufbereitet, in Algorithmen umgesetzt und in einen Demonstrator zur Bewegungssynthese implementiert (Abbildung 30). Im Demonstrator wird für einen beliebig positionierbaren Zielpunkt die jeweils korrespondierende Applikationsbewegung des Werkzeugs algorithmisch generiert. Der Zielpunkt kann dabei in seiner Lage und Ausrichtung variiert werden, das Menschmodell hat eine zuvor definierte Ausgangslage und führt anschließend die entsprechende Bewegung hin zur Zielpose aus. Damit konnte die grundsätzliche Machbarkeit der Methodik zur Aufbereitung digital erfasster Bewegungen für die Bewegungsgenerierung bestätigt werden. Bei näherer Betrachtung stellte sich jedoch heraus, dass die synthetisierten Bewegungen einer Expertenbegutachtung nicht standhalten, d. h. teilweise unnatürlich und nicht facharbeitergemäß wirken. Dies lässt sich auf zwei wesentliche Ursachen zurückführen. Einerseits wurden als Probanden Laien im Hinblick auf die ausgeführten Verrichtungen gewählt, weshalb die Motorik der aufgenommenen Bewegungen bereits nicht den Ansprüchen der humanmotorischen Richtigkeit im Kontext der menschlichen Arbeit genügt. Hierfür sind Bewegungen entsprechend geübter und eingearbeiteter Probanden zu erfassen. Auch erfolgte vor der eigentlichen Aufnahme kein Üben der jeweiligen Verrichtungen. Andererseits wurden die Bewegungen nur in wenigen Parametern variiert und nicht das gesamte Spektrum der möglichen Ausprägungen erfasst, weshalb auch eine Bewegungssynthese nur innerhalb der eingeschränkten, tatsächlich erfassten Varianz plausibel ist.

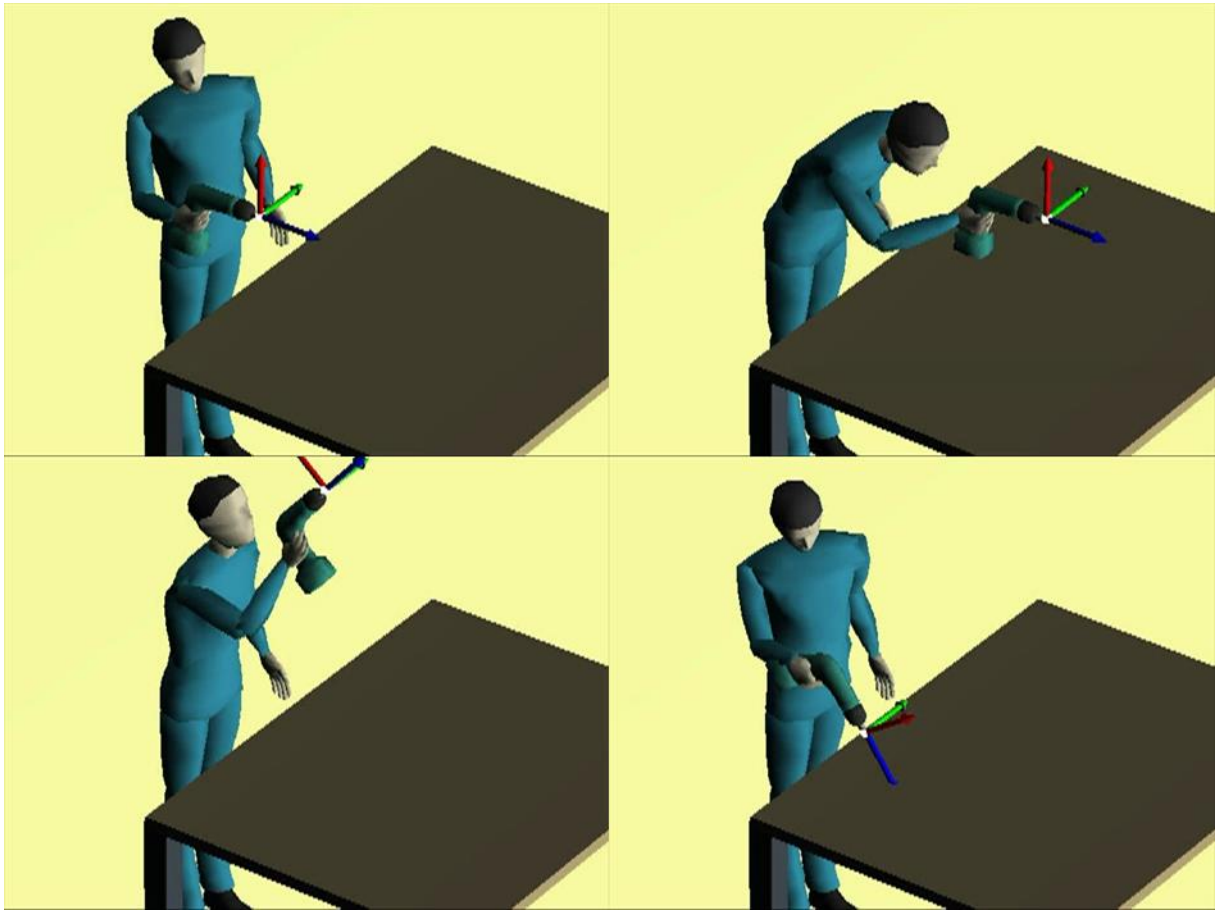


Abbildung 30 - Demonstrator zur Bewegungssynthese, Beispiel "Handhabung Akkuschrauber"

3.3.5 Zusammenfassung

Im Rahmen der ersten Studie wurden 54 ausgewählte Verrichtungen dreier Probanden unter Laborbedingungen mittels Motion Capturing erfasst und für die Bewegungssynthese aufbereitet. Die Ergebnisse wurden in einen Software-Demonstrator implementiert und hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft. Es stellte sich heraus, dass weniger die anthropometrischen Unterschiede der Probanden maßgeblich für die Bewegungsmuster sind, sondern vielmehr deren individuelle Fertigkeiten. Bei den Probanden handelte es sich um Laien im Hinblick auf die Ausführung von Montagetätigkeiten, weshalb die Ausführung, insbesondere bei der Handhabung von Werkzeugen, mitunter unnatürlich und teilweise nicht flüssig wirkte. Daher wurde eine zweite Studie unter veränderten Bedingungen initiiert.

3.4 Studie 2: Motion Capturing eines Facharbeiters

3.4.1 Untersuchungsgegenstand

Die zweite Untersuchung diente der Vertiefung der in Studie 1 gewonnenen Erkenntnisse. Dabei sollten die Defizite der vorangegangenen Untersuchung im Hinblick auf die Probandenauswahl und den Umfang der aufgenommenen Bewegungen korrigiert werden. Das Augenmerk lag auf der humanmotorisch

richtigen Ausführung der Bewegungen. Durch eine Reduzierung der Stichprobe konnte die Parametervariierung vergrößert werden, was der Qualität der Ergebnisse dienen sollte.

3.4.2 Stichprobe

Gegenstand der zweiten Versuchsserie waren ausschließlich Verrichtungen der Werkzeughandhabung. Es wurden 5 Elementarverrichtungen ausgewählt. Durch systematische Variation der Applikationslage wurden letztlich insgesamt 21 unterschiedliche Verrichtungen aufgenommen, wobei jeweils bis zu 25 einzelne Applikationen erfasst wurden (Anlage 2).
In der zweiten Versuchsserie lag der Schwerpunkt auf der facharbeitergemäßen Ausführung der Bewegungen. Daher wurde als Proband ein in Montagetätigkeiten geschulter, männlicher Werker gewählt. Der männliche Proband war mit einer Körpergröße von 1,81m und einem Gewicht von 77kg nahe dem 50. Perzentil konstituiert.

3.4.3 Versuchsdesign

Die Verrichtungen wurden unter arbeitsüblichen Bedingungen (z. B. Beleuchtung, Klima, Bodenbeschaffenheit) in einer Werkstatt durchgeführt. Der Arbeitsplatz befand sich an einer verstellbaren Hebebühne, die Tracking-Kameras wurden um den Arbeitsraum angeordnet.

Während in der ersten Studie nur zwischen horizontaler und vertikaler Applikationsrichtung unterschieden wurde, umfassen die möglichen Winkelbereiche der Werkzeugapplikation in Abhängigkeit von der Arbeitshöhe tatsächlich verschiedentlich mehr als 180°. Daher wurde ein Probekörper in Form einer Holzhalbkugel (Abbildung 31) angefertigt, der 181 vorgefertigte Bohrungen in systematischer Anordnung enthält. Die Bearbeitungspunkte sind ausgehend vom Mittelpunkt auf der Kugeloberfläche, der die Basis-Bohrung enthält, in konzentrischen Kreisen angeordnet. Dabei bestehen die ersten drei Reihen aus jeweils 12 Bohrungen, welche im Abstand von 30° angeordnet sind. Die restlichen sechs Reihen enthalten aufgrund des größeren Durchmessers jeweils 24 Bohrungen im Abstand von 15°.

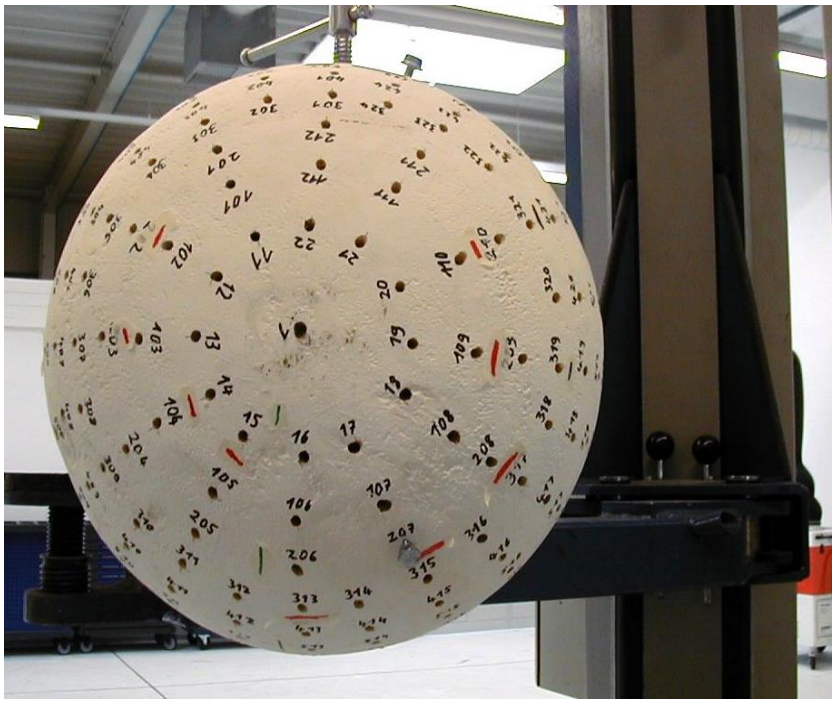


Abbildung 31 - Probekörper zur Untersuchung der Werkzeugapplikation

Der Probekörper wurde mit einer Kippvorrichtung an der Hebebühne angebracht, so dass eine Variation der Höhe und Neigung möglich war.
Es wurden fünf für den Probanden individuelle Höhen definiert:

- Kniehöhe (0,5 m),
- Hüfthöhe (0,93 m),
- Brusthöhe (1,35 m),
- Augenhöhe (1,71 m) und
- Überkopfhöhe (2,05 m).

Anhand der Erkenntnisse aus Studie 1, insbesondere aufgrund der Anmutung der Werkzeugbewegungen im Demonstrator, wurde die Hypothese abgeleitet, dass es bei der Werkzeugapplikation unterschiedliche, vom Wirkpunkt abhängige Arbeitsweisen gibt. Es wurde vermutet, dass es einerseits Bereiche gibt, in denen eine stetige Anpassung der Pose des Werkers erfolgt und andererseits Bereiche in denen eine sprunghafte Änderung der Pose, also eine grundlegende Veränderung der Werkzeug-Handhabung erfolgt (Umschlagzonen, Abbildung 32). Die Auslegung des Probekörpers diente zur Untersuchung dieser Hypothese.

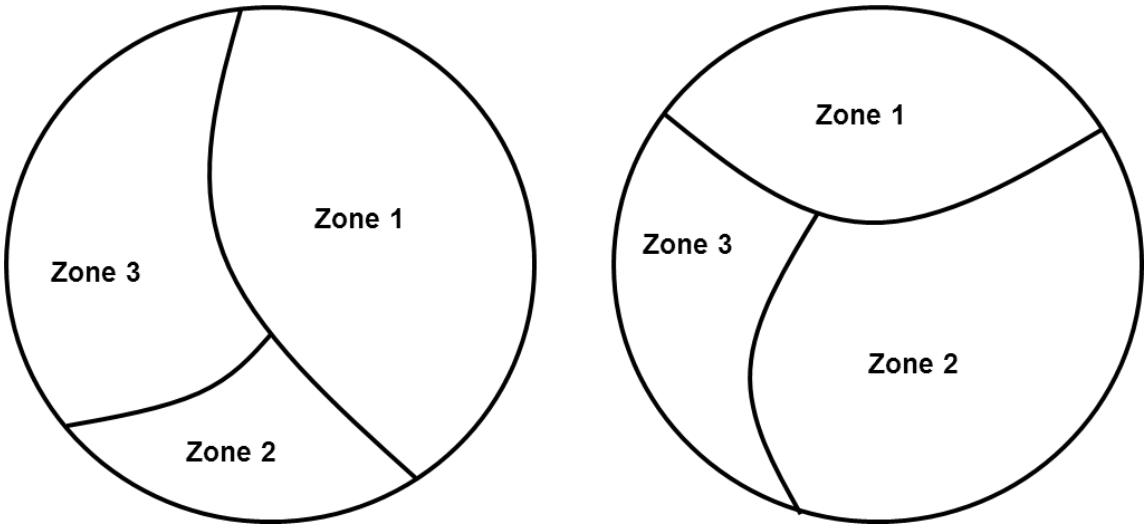


Abbildung 32 - Mögliche Umschlagzonen bei der Handhabung von motorisch angetriebenen (links) und manuell betätigten Werkzeugen (rechts)

Für die Ausführung der Verrichtungen wurde ferner eine Stellfläche vor dem Probekörper festgelegt, so dass keine beliebige Zugänglichkeit zum Applikationspunkt möglich war. Dies entspricht den Bedingungen, welche auch in einer realen Arbeitsumgebung vorherrschen.

Vor der eigentlichen Aufnahme fand zunächst eine umfassende Vorbereitung einschließlich probeweiser Durchführung der Verrichtungen analog der späteren Aufnahme, im Weiteren als Simulationstag bezeichnet, statt. Dabei wurden sämtliche Versuchsaufbauten realisiert und das Vorgehen getestet. Insbesondere diente der Simulationstag der Herleitung spezifischer Hypothesen zur Ausführung der jeweiligen Verrichtungen, wobei die typischen umschlagfreien Zonen festgelegt und die zu berücksichtigenden Bohrungen sowie deren Reihenfolge ermittelt wurden. Während dieser Vorversuche wurde der Werker für den Ablauf des folgenden Aufnahmetages trainiert, d. h. mit dem Aufnahmeprozedere vertraut gemacht und für die Kriterien der Bewegungsausführung sensibilisiert, um die humanmotorische Richtigkeit der später erfassten Bewegungen sicherzustellen. Die Reihenfolge der Applikationspunkte wurde so gewählt, dass sie jeweils entlang der vermuteten Zonen-Grenzen lagen sowie anschließend deutlich in einer anderen Zone, um klare Umschläge erkennen zu können. Weiterhin diente der Simulationstag der Zeitabschätzung für den Aufnahmetag.

Während des Aufnahmetages wurden für die verwendeten Werkzeuge wiederum eigene Targets konfiguriert, so dass deren Bewegungen ebenfalls erfasst werden konnten. Die Verrichtungen wurden jeweils in Blöcken durchgeführt, d. h. es wurde jede Verrichtung an einer Reihe von Wirkpunkten direkt hintereinander durchgeführt, worauf eine Pause folgte, in welcher der Proband in eine Grundstellung zurückkehrte und auch das Werkzeug in eine Grundauslage in der rechten Hand brachte.

Anschließend wurde dieselbe Verrichtung an anderen Wirkpunkten erneut durchgeführt.

3.4.4 Ergebnisse

Die aufgenommenen Bewegungen wurden wiederum auf das digitale Menschmodell Dynamicus übertragen und für die Auswertung mit der Visualisierungs-Software Ergo-Tool aufbereitet.
Die während der Versuchsplanung entwickelten Hypothesen bzgl. vorhandener umschlagfreier Zonen wurden anhand der Motion-Capture-Daten überprüft. Grundsätzlich konnten die bereits zum Simulations-Tag definierten Zonen bestätigt werden, wobei ggf. Korrekturen der Zonengrenzen notwendig waren. In Abbildung 33 sind drei Zonen für die Verrichtung „Handhabung Akkuschrauber mit Pistolengriff, Brusthöhe“ schematisch anhand des Probekörpers sowie in Form von typischen Posen dargestellt. Obwohl der Proband Rechtshänder war, führte er die Werkzeughandhabung für Wirkpunkte im äußeren linken Bereich des Probekörpers (Zone 1) mit der linken Hand aus. Im zentralen Bereich (Zone 2) benutzte der Proband die rechte Hand, wobei die Werkzeug-Betätigung mit dem Mittelfinger erfolgte. Für Wirkpunkte am äußeren rechten Rand des Probekörpers (Zone 3) wechselte der Proband die Greifart des Werkzeugs und betätigte den Taster mit dem Daumen. Innerhalb der Zonen erfolgte eine stetige Posenanpassung, wobei die Grundhaltung konstant blieb.

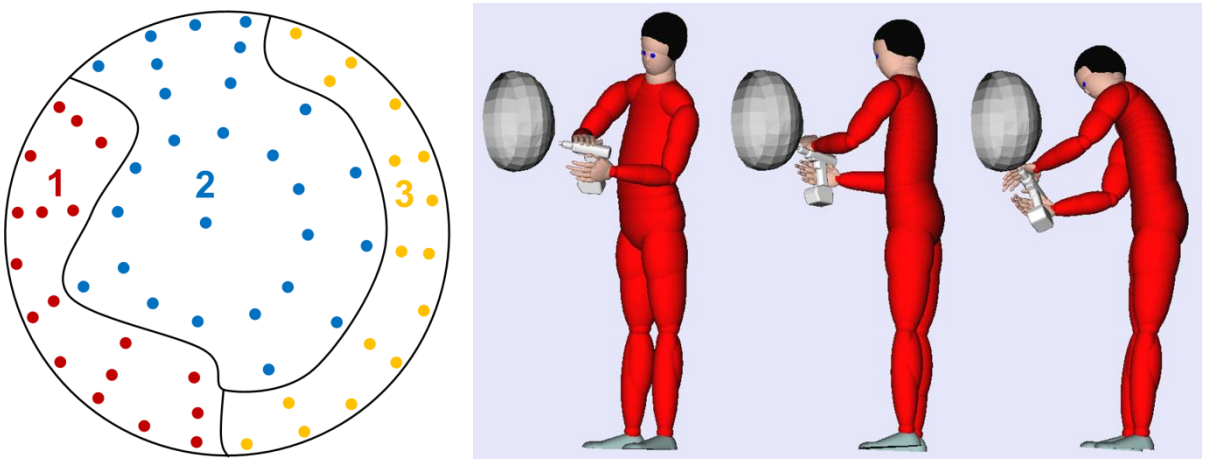


Abbildung 33 - Umschlagzonen für die Verrichtung „Handhabung Akkuschrauber"

Im Anschluss an die Einteilung der verschiedenen Zonen wurden die Bewegungen feingranular zergliedert in typische, wiederkehrende Teilbewegungen. In Abbildung 34 sind die vier identifizierten Phasen der Verrichtung „Handhabung Eindrückwerkzeug“ dargestellt. Zunächst erfolgt eine Vorpositionierung der Hand über dem Eindrückwerkzeug (1). Anschließend erfolgt die Schlagbewegung auf das Werkzeug (2). Darauf folgt die Phase des eigentlichen Eindrückens (3), wenn die

Hand das Werkzeug erreicht hat. Schließlich wird die Hand wieder vom Werkzeug weggeführt (4).

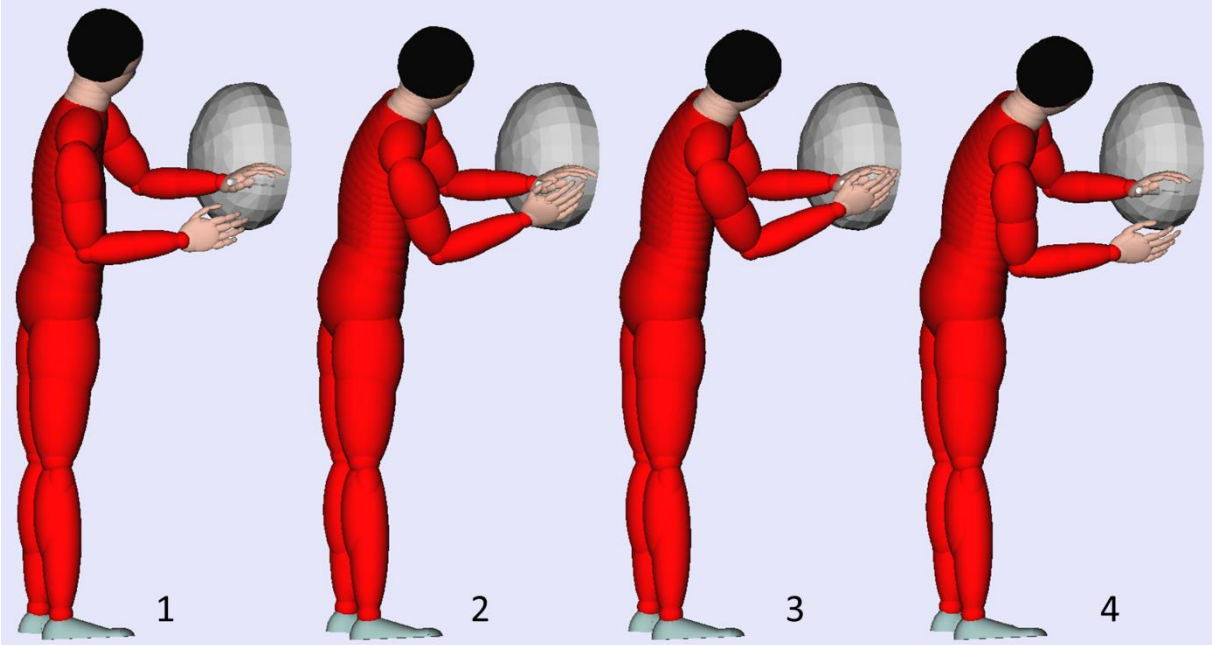
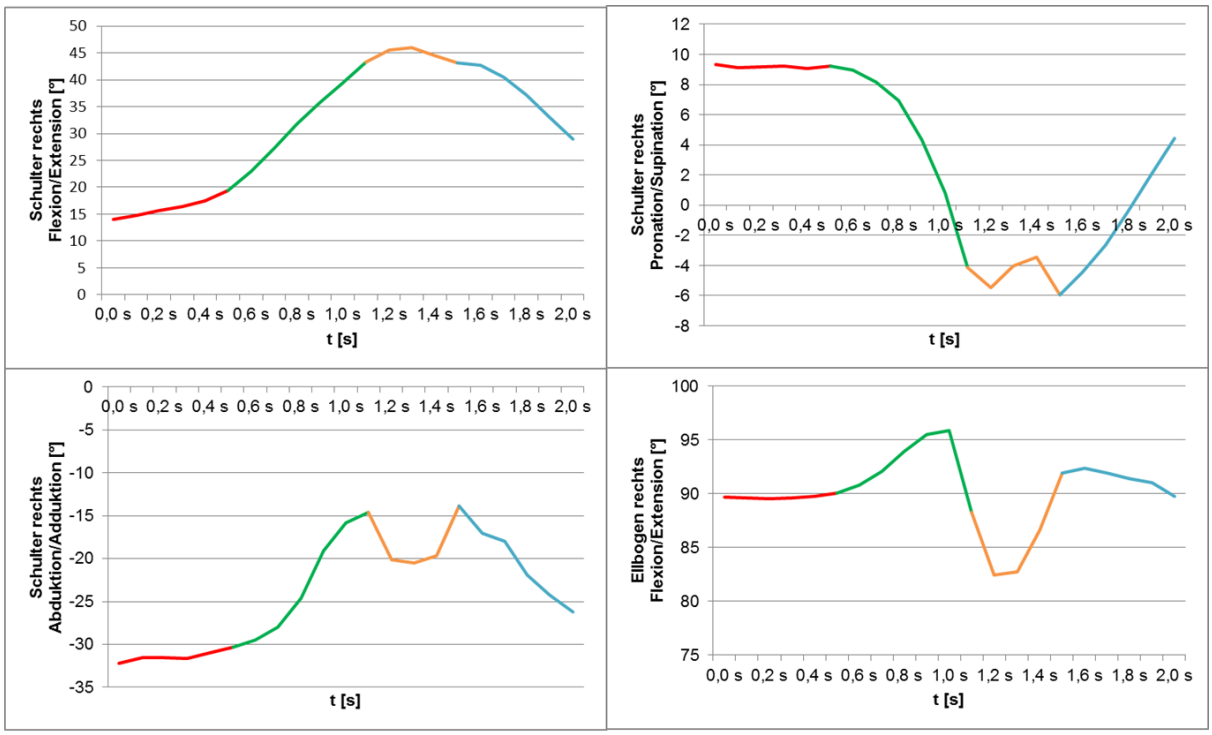


Abbildung 34 - Phasen der Verrichtung „Handhabung Eindrückwerkzeug“

In den Gelenkwinkelverläufen des rechten Arms (Abbildung 35) sind die Phasen deutlich zu erkennen. Die Vorpositionierung der Hand über dem Werkzeug setzt sich aus einem leichten Strecken des Armes nach vorn bei gleichzeitigem geringem Abspreizen zusammen, wobei die Bewegung langsam erfolgt. Die sich anschließende Schlagbewegung ist durch eine weiteres Strecken und Abspreizen des Armes und zusätzliche Rotation gekennzeichnet, die Bewegung erfolgt schnell. Während der tatsächlichen Eindrückbewegung sind Armstreckung und Rotation weitgehend konstant, es sind Ausgleichs- bzw. Bremsbewegungen im Ellbogengelenk sowie in Form der Armabspreizung sichtbar. Die Rückführbewegung der Hand nach dem Eindrücken erfolgt umgekehrt zur Schlagbewegung.



1: Vorpositionierung der Hand
2: Schlagbewegung zum Werkzeug
3: Eindrückbewegung, Hand am Werkzeug
4: Wegführen der Hand vom Werkzeug

Abbildung 35 - Gelenkwinkelverläufe während der Phasen der Verrichtung „Handhabung Eindrückwerkzeug“

Wiederum konnten idealtypische Körperausrichtungen zum Wirkpunkt, nunmehr auch unter Berücksichtigung der Applikationsrichtung identifiziert werden, wobei neben der Rotation des Körpers auch die entsprechende Neigung berücksichtigt wurde.

Die Verläufe der erkannten Teilbewegungen dienten anschließend als Basis der mathematischen Aufbereitung der Bewegungsdaten in Algorithmen zur Bewegungssynthese. Dabei wurden für die Verrichtungen für die jeweils an der Bewegung beteiligten Gelenkwinkel mittels Regression Funktionen in Abhängigkeit der Applikationslage und -richtung sowie des zeitlichen Verlaufes entwickelt (Thiele, 2011).

Wenngleich die Erkenntnisse zum Bewegungsverhalten von nur einem Probanden nicht als allgemeingültig angenommen werden dürfen, konnte mit Hilfe der Studie aufgezeigt werden, dass auf Basis von erfassten Realbewegungen mathematische Formulierungen für das parameterabhängige Bewegungsverhalten ermittelt werden können. Ausgehend von den beiden vorgestellten Studien wurde eine methodische Vorgehensweise entwickelt, mit welcher real erfasste Bewegungsdaten in Verrichtungsdaten überführt und anschließend zur Bewegungssynthese aufbereitet werden können (siehe Kapitel 3.5).

3.4.5 Zusammenfassung

In der zweiten Studie wurden 21 Verrichtungen der Werkzeughandhabung eines mittelgroßen, männlichen Probanden, der über die notwendigen Fähigkeiten und Fertigkeiten verfügte, aufgenommen. Es konnte nachgewiesen werden, dass Körperstellungen zwischen verschiedenen Applikationslagen nicht kontinuierlich variieren, sondern dass es Zonen gleicher Grundausrichtung gibt und zwischen diesen Zonen Umschlaggrenzen existieren, an denen die Applikationsart grundlegend wechselt. Dabei stellte sich heraus, dass der geübte Facharbeiter zur beidhändigen Ausführung der Verrichtungen in der Lage ist und intuitiv jeweils die Hand wählt, die eine bessere Kraftaufbringung bzw. das Einnehmen einer Komforthaltung ermöglicht.
Aus den gewonnenen und aufbereiteten Daten wurden exemplarisch Gleichungen zur Beschreibung menschlicher Bewegungen abgeleitet, welche zur Generierung zielgerichteter menschlicher Bewegungen angewandt werden können.

3.5 Entwicklung einer Methode zur Bewegungserfassung und -aufbereitung

Aus den Voruntersuchungen sowie den Ergebnissen der beiden Studien (Kapitel 3.3 und 3.4) wurde ersichtlich, dass zur Bewegungsgenerierung einerseits vielfältige theoretische Vorüberlegungen zur Auswahl und Eingrenzung des Untersuchungsbereiches und der Festlegung der Parameter notwendig sind. Anderseits sind aber das Erfassen und Auswerten realer Bewegungen unabdingbar. Es ist also weder ein rein deduktives noch ein ausschließlich induktives Vorgehen allein geeignet. Vielmehr müssen theoretische Vorüberlegungen in entsprechende Untersuchungsdesigns überführt werden und die in den Untersuchungen gewonnen Ergebnisse sind anschließend anhand praktischer Versuche zu überprüfen und kontinuierlich zu verfeinern.
Dazu wurde ein Beschreibungsmodell zur Vorgehensweise entwickelt, welches vier Phasen umfasst. Die erste Phase umfasst die Vorbereitung und Analyse, die zweite Phase die tatsächliche digitale Erfassung, die dritte Phase die Aufbereitung und Prüfung der Bewegungsdaten. Die sich anschließende vierte Phase der Systemanwendung beinhaltet die Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse für die Bewegungssynthese. Die vier Phasen werden im Folgenden erläutert.

3.5.1 Vorbereitung und Analyse

Die Vorbereitung beginnt mit der Auswahl der zu untersuchenden Verrichtungen und damit einhergehend mit der Definition der zu variierenden Parameter. Grundlage hierfür ist die Bibliothek der möglichen Verrichtungen (Kapitel 3.1). Weiterhin sind Überlegungen zur Versuchsanordnung und den notwendigen Requisiten zu treffen.

Nach dem Aufstellen eines groben Versuchsplanes und der Beschaffung bzw. Herstellung des Versuchsaufbaus folgt ein Simulationstag. An diesem Tag werden zunächst der Versuchsstand und die Versuchsanordnung detailliert. Dabei werden bspw. Applikationshöhen und Standflächen des Probanden festgelegt. Anschließend wird durch ein Team von Arbeitsplanern, Ergonomen, Dynamikern und Praktikern der aufzunehmende Vorgang mit dem Probanden geübt, durch die Teammitglieder beobachtet und bewertet. Dabei werden für die geometrischen Lagen der Applikationspunkte Bereiche gesucht,

- in denen eine stetige Änderung der Pose des Arbeiters erfolgt und
- in denen eine sprunghafte Änderung der Pose, d. h. ein Wenden des Werkzeugs in eine völlig andere Handhabung, erfolgt.

Diese Bereiche werden protokolliert und ihre geometrischen Grenzen bestimmt. Auf dieser Basis erfolgt eine exakte Versuchsplanung für den Aufnahmetag, an dem die Verrichtungen bereichsweise getrennt aufgenommen werden.

Während des Simulationstages wird der Proband mit der Versuchsanordnung und -umgebung vertraut gemacht und in den aufzunehmenden Verrichtungen trainiert, wobei ggf. eine Korrektur seiner Bewegungsabläufe unter ergonomischen oder technologischen Gesichtspunkten erfolgt, sofern etwaige Fehler durch die Teammitglieder festgestellt werden. Obwohl es sich bei dem Probanden um einen qualifizierten Facharbeiter handelt, ist ein Training der konkreten Bewegungen notwendig, da nachweislich lokale Trainingseffekte für explizit eingeübte Bewegungspfade auftreten, unabhängig von der globalen Trainiertheit. Demnach werden trainierte Bewegungen flüssiger und gleichmäßiger ausgeführt (Haggard, Leschziner, Miall, & Stein, 1997). Somit wird der Proband in die Versuchsanordnung eingearbeitet.

Basierend auf den erkannten Umschlagbereichen folgt letztlich die Erarbeitung eines Ablaufplans für die spätere Bewegungserfassung, um einerseits flüssige Bewegungen innerhalb der erkannten Zonen zu gewährleisten und andererseits klare Umschlaggrenzen zwischen den Zonen erkennen zu können.

Der Simulationstag dient außerdem der Zeitabschätzung für die späteren Aufnahmen, um dann schließlich alle geplanten Versuche durchführen zu können. Damit wird sichergestellt, dass zwischen den einzelnen Versuchen keine Unterschiede entstehen, etwa durch tagesabhängige Differenzen der Fähigkeiten des Probanden.

Die Vorbereitungen enden mit der Vermessung der Versuchsanordnung und -gegenstände sowie des Probanden.

3.5.2 Digitale Erfassung

Dem Simulationstag folgt das eigentliche Aufnehmen, das Motion Capturing, gemäß dem erarbeiteten Versuchsplan. Es werden die Bewegungen digital als Vektoren der

einzelnen Targets im Raum erfasst. Auf diese Weise wird ein Abbild einer Bewegung gewonnen, die nachweislich ein Mensch so ausgeführt hat, d. h. deren Wahrheitsgehalt zunächst unstrittig ist. Während der Aufnahme erfolgt die Ausführung der Verrichtungen jedoch unter idealisierten Bedingungen am Versuchsaufbau. Es ist folglich zu gewährleisten, dass durch die Idealisierung der Bewegung die humanmotorische Richtigkeit nicht verloren geht. Etwaige Fehlgriffe des ausführenden Probanden sind bei der Beobachtung umgehend zu korrigieren. Ferner muss ein weitgehend kontinuierliches Verhalten während der Bewegungen sichergestellt werden, mögliche Rucke oder Stöße sind zu vermeiden. Dies erfordert einen entsprechend guten Sitz der Marker am Probanden, so dass dessen Bewegungsfreiheit nicht eingeschränkt wird. Zusätzlich führt ein Verrutschen der Targets zu späteren Unstimmigkeiten bei der Datenaufbereitung.
Je nach Motion-Capture-System sind etwaige störende Einflüsse zu vermeiden. Beim optischen Tracking sind dies z. B. reflektierende metallische Gegenstände im Aktionsraum. Gleichzeitig muss aber sichergestellt werden, dass die Versuche unter üblichen Umgebungsbedingungen, also realitätsnah, durchgeführt werden können. Unzureichende Beleuchtung etwa kann sich auf die Körperhaltung auswirken, indem der Proband sich näher an die Wirkstelle positioniert, um ausreichend sehen zu können.
Während der Aufnahmen wird der Proband fortwährend beobachtet, um später bspw. vorhandene Unstimmigkeiten in der Bewegung erklären zu können. Außerdem ist eine sorgfältige Protokollierung notwendig, so können bei der sich anschließenden Auswertung die jeweils aufgenommenen Bewegungen den einzelnen Ausführungsparametern exakt zugeordnet werden.

3.5.3 Aufbereitung und Prüfung

Nach der Aufnahme werden die Daten vom PC des Motion Capturing Systems auf ein digitales Modell übertragen. Dabei werden diese geglättet und fehlerbereinigt, sodass anschließend kontinuierliche Bewegungsverläufe vorliegen. Bei der Glättung werden die Bewegungsverläufe derart vereinfacht, dass Positionsänderungen der Targets im hochfrequenten Bereich, die nicht der normalen Bewegungsfrequenz eines Menschen entsprechen, eliminiert werden. So entsteht eine kontinuierliche Trajektorie der Targets. Außerdem müssen Fehler der Aufzeichnungstechnik beseitigt werden, bspw. nichterkannte Marker oder numerische Fehler. Diese sind an Sprüngen in der Bewegung zu erkennen. Ferner sind aber auch erkennbare Fehlgriffe des ausführenden Probanden zu eliminieren oder fehlende Daten zu ergänzen. Anschließend erfolgt eine Vektorisierung der Daten in standardisierte Bewegungsdaten, die sich auf das exakte Probandenmodell beziehen. Die aufgenommenen Bewegungen werden in Form von Gelenkwinkeln beschrieben. Die Datenaufbereitung erfordert entsprechende Expertise sowohl in der Anwendung des

eingesetzten Motion-Capture-Systems als auch in der Mathematik und Biomechanik des Menschen, daher werden diese Arbeitsschritte durch die hierin qualifizierten Teammitglieder durchgeführt.
Im nächsten Schritt erfolgt eine Weiterverarbeitung der Daten. Mit Hilfe der Visualisierung und graphischen Darstellung der Gelenkwinkelverläufe werden die Aufnahmen zunächst auf Einzelverrichtungen zugeschnitten und danach in Subverrichtungen, d. h. Bewegungsphasen innerhalb der Verrichtungen, zergliedert.
Anschließend erfolgt die Auswertung der Daten für die Parametrisierung. Es werden mathematische Gesetzmäßigkeiten der Sub-Bewegungsverläufe abgeleitet sowie idealtypische Zielposen beschrieben. Diese Tätigkeit erfordert einerseits hinreichende Kenntnisse der Arbeitsgestaltung, um die Bewegungsmuster den Tätigkeiten entsprechend zuordnen zu können und etwaige Fehlversuche mit untypischem Bewegungsverhalten zu erkennen. Andererseits ist ausreichend Kenntnis im Hinblick auf mathematische Modellierung und Anwendung von Regressionsverfahren notwendig, um die ausgewählten Gelenkwinkelverläufe in mathematische Vorschriften zu überführen. Daher ist hierfür ein interdisziplinäres Team aus Arbeitsplanern und Mathematikern notwendig. Die ermittelten Bewegungsmuster werden mit Metadaten versehen, bspw. Verrichtungsbezeichnung oder Applikationshöhe, und stehen daraufhin für eine Anwendung zur Bewegungsgenerierung in Form einer Typenbewegungsdatenbank zur Verfügung.
Für die Bewegungssynthese ist es notwendig, neben der Bewegungsdatenbank und den abgeleiteten Algorithmen außerdem auf zusätzliches Wissen über die jeweiligen Verrichtungen zuzugreifen. Das folgende Beispiel soll dies verdeutlichen: Grundlage der Bewegungssynthese ist die hoch aggregierte, parametrisierte Beschreibung der Verrichtung, etwa „Objekt aufnehmen und am Zielpunkt platzieren“. Die Parameter sind das ausgewählte Objekt sowie der Zielpunkt. Aus der Bewegungsdatenbank kann zwar die Bewegung der Hand hin zu einem Punkt entnommen werden, dieser ist jedoch noch nicht bekannt. Aus der Wissensdatenbank muss folglich noch entnommen werden, wie das Objekt mit seiner spezifischen Geometrie üblicherweise gehandhabt wird, wo also der Greifpunkt liegt. Erst mit definiertem Greifpunkt ist die Beschreibung vollständig, so dass nun die gewünschte Trajektorie der Hand ermittelt werden kann.

3.5.4 Anwendung zur Bewegungssynthese

Stehen aufbereitete Bewegungsdaten sowie das zugehörige Verrichtungswissen zur Verfügung, können diese nun zur Bewegungssynthese angewandt werden. Dabei werden mittels eines entwickelten Bewegungsgenerators auf Basis der erfassten Bewegungen bzw. den daraus abgeleiteten Algorithmen neue Bewegungen generiert, d. h. die Erkenntnisse zur menschlichen Bewegung werden auf eine

spezielle Arbeitsaufgabe während der Planung angepasst. Dabei wird der in der folgenden Abbildung 36 dargestellte Prozess durchlaufen:

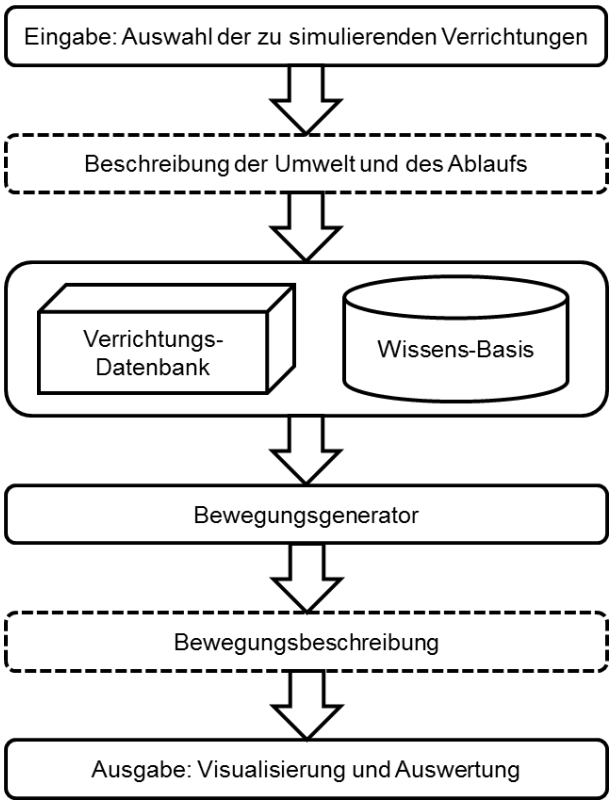


Abbildung 36 - Schema der Bewegungsgenerierung

Der Anwender definiert durch seine Eingabe, wie die Umgebung aussieht und welche Verrichtungen mit welcher konkreten Parameterausprägung nacheinander simuliert werden sollen. Das Ergebnis ist eine Beschreibung der Umwelt sowie der beabsichtigten Handlungen. Anschließend wird aus der Typenbewegungsdatenbank die jeweils für den konkreten Fall ähnlichste Bewegung ausgewählt. Dabei werden zusätzlich notwendige Parameter aus der Verrichtungswissensbasis abgeleitet. Die ausgewählten Typenbewegungen werden nun an die geforderte Verrichtungsgeometrie unter Nutzung der Metadaten angepasst. Notwendige Zwischenbewegungen, welche nicht der der Typenbewegungsdatenbank enthalten sind, werden algorithmisch synthetisiert. Für jede Bewegung wird überprüft, ob das gewünschte Ziel erreicht wird, bspw. ob eine Werkzeuganwendung an dem vom Anwender festgelegten Wirkpunkt tatsächlich erfolgen kann. Nachdem die vom Anwender vorgegebene Ablaufbeschreibung durch die Verrichtungsdatenbank und die Wissensbasis mittels Bewegungsgenerator-Komponente in eine konkrete Bewegungsbeschreibung überführt wurde, erfolgt die Ausgabe in Form der Visualisierung. Der Anwender kann die Simulation betrachten und optional weitere Auswertungen vornehmen, etwa ein Postprocessing zur Überprüfung und Bewertung der generierten Bewegung hinsichtlich Biomechanik, Ergonomie oder Zeit.

3.5.5 Zusammenfassung

Aus den Erfahrungen der beiden durchgeführten, empirischen Bewegungs-Studien (Kapitel 3.3 und 3.4) und anhand der gewonnenen Daten wurde eine vier Phasen umfassende Methode zur Aufbereitung und anschließenden Anwendung der Daten zum Zweck der Bewegungsgenerierung entwickelt (Abbildung 37).

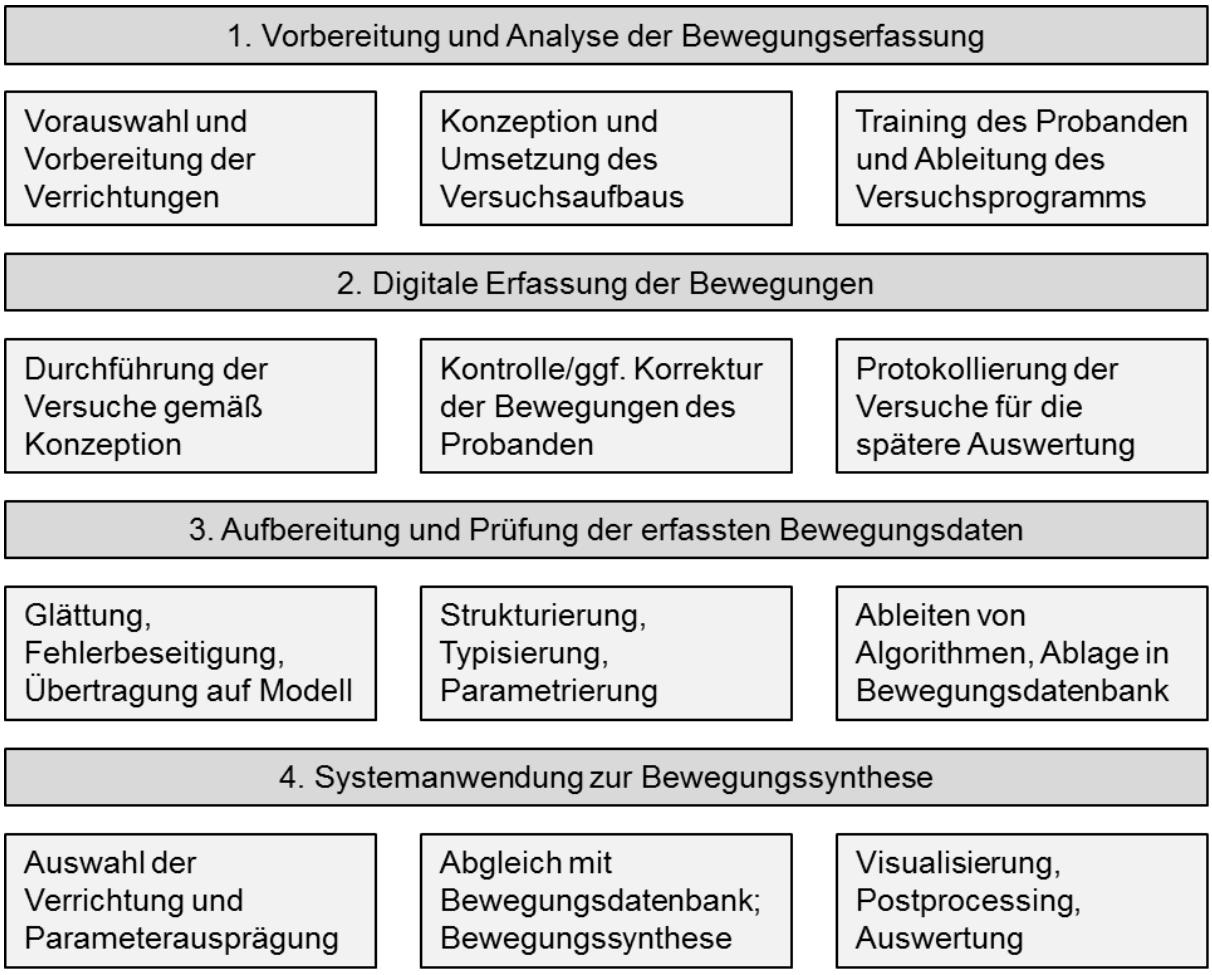

1. Vorbereitung und Analyse der Bewegungserfassung
Vorauswahl und Vorbereitung der Verrichtungen
Konzeption und Umsetzung des Versuchsaufbaus
Training des Probanden und Ableitung des Versuchsprogramms
2. Digitale Erfassung der Bewegungen
Durchführung der Versuche gemäß Konzeption
Kontrolle/ggf. Korrektur der Bewegungen des Probanden
Protokollierung der Versuche für die spätere Auswertung
3. Aufbereitung und Prüfung der erfassten Bewegungsdaten
Glättung, Fehlerbeseitigung, Übertragung auf Modell
Strukturierung, Typisierung, Parametrierung
Ableiten von Algorithmen, Ablage in Bewegungsdatenbank
4. Systemanwendung zur Bewegungssynthese
Auswahl der Verrichtung und Parameterausprägung
Abgleich mit Bewegungsdatenbank; Bewegungssynthese
Visualisierung, Postprocessing, Auswertung

Abbildung 37 - Methode zur Systembefüllung: Phasen und Inhalt

3.6 Ableitung idealtypischer Bewegungsmuster

Mit Hilfe der in Kapitel 3.5 entwickelten Methode sowie ausgehend von den durchgeführten Untersuchungen wurden bereits idealtypische Bewegungsmuster abgeleitet, welche die Handhabung von Werkstücken wie auch Werkzeugen umfassen. Gleichwohl konnten im Rahmen der Studien nicht ausreichend Bewegungen erfasst werden, um eine vollständige Datenbankbefüllung zu realisieren. Vielmehr handelte es sich zunächst um eine Machbarkeitsprüfung, auf deren Basis künftig weitere Verrichtungen erfasst und aufbereitet werden müssen.

3.6.1 Werkstückhandhabung

Die Mehrzahl der Verrichtungen umfasst Interaktionen mit Objekten. Deren Handhabung unterscheidet sich, je nachdem ob es sich um Einzelteile, Zusammenbauten, Ladungsträger oder Werkzeuge handelt, erheblich. Beeinflusst wird die Greif- und Transportweise von den Eigenschaften der Objekte sowie von den geometrischen Bedingungen der Umgebung. Um Bewegungsmuster der Objekthandhabung zu entwickeln, müssen die Greifart und Greifpunkte am Objekt zunächst ermittelt werden, um dann die Bewegung hin zur notwendigen Endpose zu generieren zu können. Um dies zu erreichen, ist eine mehrstufige Betrachtung der folgenden Parameter notwendig:

1. Objektklassifizierung,
2. Prüfung der Ausführbarkeit,
3. Entscheidung zwischen ein- und beidhändigem Greifen,
4. Festlegung der Greifart sowie
5. Festlegung der Greifposition bzw. Greifpunkte am Objekt.

Durch Versuche an unterschiedlichen Objekten konnten im Wesentlichen die folgenden Einflussgrößen für die Handhabung identifiziert werden:

- Teilegröße: äußere Abmessungen,
- Teileform: Grundform des Objektes (Formklasse) sowie Erweiterungsform (z. B. Grifföffnungen),
- Masse,
- Beschaffenheit von Kanten und Oberfläche,
- Steife,
- Empfindlichkeit des Objektes sowie
- mögliche Gefährdung durch Handhabung des Objektes.

Zur algorithmischen Umsetzung müssen die Parameter klassifiziert werden. Nicht alle Eigenschaften sind einem digitalen Modell ohne weiteres zu entnehmen (z. B. Steife) bzw. erfordern diese komplexe, ggf. nicht echtzeitfähige Algorithmen (z. B. Formklassifizierung mittels Skelettierung (Brunner, D., 2007)). Daher wurden zur weiteren Betrachtung insbesondere die Größe und Grundform sowie die Masse berücksichtigt.

Als Grundlage zur Greifklassifikation wurde eine einfache Objekteinordnung anhand des Object-Bounding-Volume[2] in Verbindung mit der Masse entwickelt. Ausgehend von einem quaderförmigen Object-Bounding-Volume, kann anhand dessen Maßen das Objekt eindeutig einer Klasse zugeordnet werden. Die Masse eines Objektes stellt eine für das Handhaben bedeutende Einflussgröße dar und sollte in der Regel bekannt sein oder zumindest abgeschätzt werden können. Anhand der

[2] einfacher geometrischer Berandungskörper, der das komplexe Objekt umschließt, (Jackèl, Neunreither, & Wagner, 2006)

durchgeführten Greifversuche wurde, in Verbindung mit einer studentischen Arbeit, ein Algorithmus zur Festlegung von Greifart und Greifpunkten entwickelt (Tilch, 2012).

Zunächst erfolgt eine Zuordnung des Werkstückes zu einer von zwölf Kategorien in Abhängigkeit der Abmessungen und Seitenverhältnisse des Object-Bounding-Volume sowie der Masse. Je nach Größenausprägung eines Objektes wird außerdem festgelegt, ob das Greifen durch eine Person überhaupt möglich ist oder ob die Werkstückgeometrie ggf. eine Kooperation mehrerer Personen bedingt.

Die Greifpunkt-Ermittlung auf Basis des Object-Bounding-Volume stößt bei vorhandenen Griffen oder Grifföffnungen, bspw. bei Ladungsträgern, sowie bei festgelegten Greifpunkten, etwa bei Werkzeugen, an ihre Grenzen. In diesen Fällen ist eine manuelle Definition der Greifpunkte notwendig. Dies gilt ebenso bei einer Beschaffenheit des Objektes, die ein Greifen an den ermittelten Greifpunkten unmöglich macht, etwa bei Scharfkantigkeit.

Um arbeitsgestalterische Defizite bereits bei der Bewegungsgenerierung zu verdeutlichen, wurde in den erarbeiteten Greif-Algorithmus eine Grenzlastüberprüfung in Anlehnung an DIN EN 1005-2 (2009) implementiert. Auf Basis der geometrischen Rahmenbedingungen wird die tatsächliche Last mit einer zulässigen Grenzlast verglichen, bei deren Überschreiten der Anwender auf das Gestaltungsproblem hingewiesen wird. Weiterhin wird entschieden, ob das Aufnehmen mit einer oder beiden Händen erfolgt. Im Rahmen der Versuche wurden typische Bewegungsmuster beobachtet, die jedoch nicht zwingend ergonomischen Gesichtspunkten genügen. Außerdem existieren noch verbleibende Freiheitsgrade der Bewegung. Beispielsweise ist das Aufnehmen eines Werkstückes vom Boden sowohl durch Beugen der Beine mit aufrechtem Oberkörper als auch durch weites Vorneigen des Oberkörpers bei gestreckten Beinen möglich. Um diese Freiheitsgrade einzuschränken wurde ein etabliertes Verfahren zur Beurteilung von Körperhaltungen bei der Entwicklung der Bewegungsalgorithmen berücksichtigt. Mittels OWAS (Karhu, Kansi, & Kuorinka, 1977) können Körperstellungen hinsichtlich der daraus resultierenden Belastung beurteilt werden. OWAS ist ein vergleichsweise einfaches arbeitswissenschaftliches Verfahren, da es eine überschaubare Anzahl an Haltungskombinationen und keine weiteren Faktoren wie Repetition umfasst (vgl. Kapitel 2.3.3). Daher lässt es sich einfach zur Posenbewertung eines Menschmodells einsetzen. Die Anwendung des OWAS-Verfahrens dient hier nicht der Ergonomie-Analytik für erstellte Simulationen sondern der Bewegungsgenerierung und beschränkt sich auf die für das Aufnehmen von Lasten relevanten Körperstellungen, besonders des Rumpfes sowie der Arme. Bei der Ermittlung der Zielpose für das Aufnehmen der Last wird ein Körperhaltungspunktwert ermittelt. Die Minimierung dieses Punktwertes ist im Regelwerk der inversen Kinematik des Bewegungsalgorithmus integriert. Perspektivisch sollen werkerübliche

Körperstellungen in Abhängigkeit von Lage und Lastgewicht der aufzunehmenden Objekte über weitere Versuche ermittelt werden, um die Qualität der Bewegungsgenerierung zu erhöhen.

Die Laborversuche und Motion-Capture-Studien zeigten, dass alle mit der Handhabung von Objekten verbundenen Verrichtungen eine Vorpositionierung zum Objekt beinhalten. Der dabei eingenommene Abstand folgt keiner erkennbaren Systematik, sondern erfolgt weitgehend intuitiv. Es zeigt sich, dass ein individueller, anthropometrisch bedingter Abstand zum Objekt eingenommen wird. Dieser entspricht etwa der individuellen Schulterbreite bzw. Körpertiefe, wobei vorhandene Störgeometrien diesen Abstand entsprechend vergrößern, um unerwünschte Kollisionen zu vermeiden. Die Ausrichtung zum Objekt ist abhängig vom Greiffall sowie der Umgebung. Beim beidhändigen Greifen liegen der Blickrichtungsvektor des Menschen und die Objekt-Frontflächennormale auf einer vertikalen Ebene, d. h. der Mensch positioniert sich mittig vor dem zu greifenden Objekt. Beim einhändigen Greifen liegen Objekt-Frontflächennormale und Blickrichtungsvektor derart seitlich versetzt, dass das Objekt mittels Nachvorngreifens des Armes aufgenommen werden kann.

Für jede Objektkategorie wurden unter Berücksichtigung etwaiger horizontaler oder vertikaler Störgeometrien idealisierte Bewegungsabläufe identifiziert und parametrisiert. Im Ergebnis dessen wurde ein Algorithmus entwickelt, der automatisch eine Bewegungsfolge für das Aufnehmen beliebiger Objekte in Abhängigkeit von Geometrie, Masse und Lagerung generiert. In Abbildung 38 ist beispielhaft die Greiffolge für das Entnehmen einer Streifenplatte in Regallagerung dargestellt.

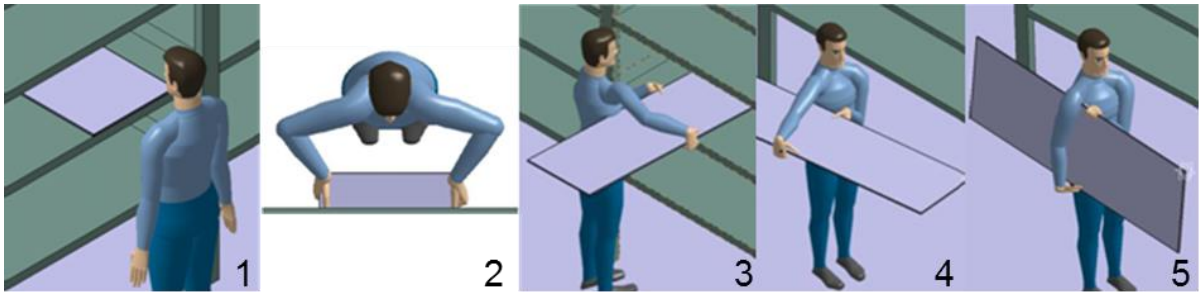


Abbildung 38 - Greiffolge für den Objekttyp „Streifenplatte"

Durch die Geometrie wurde das Objekt als „Streifenplatte“ identifiziert, das bedeutet, die kürzeste Dimension (Höhe) hat eine Länge von weniger als 50mm, die längste Dimension (Länge) ist mindestens 4-mal so lang wie die mittlere (Breite), wobei die Länge eine Abmessung von 100mm übersteigt. Durch die Abmessungen wurde ferner identifiziert, dass ein Tragen durch eine Person allein möglich ist. Durch die Vorpositionierung des Menschmodells vor das Werkstück (1) wird der Fall des Handhabens definiert, im gezeigten Beispiel beginnend an der kurzen Seite. Zunächst erfolgt ein beidhändiges Greifen mittels Zufassungsgriff seitlich am Objekt

(2), gefolgt vom Hervorziehen um eine definierte Distanz, weniger als die Länge des Objekts, so wird ein Kippen verhindert. Nach einem Umpositionieren des Menschmodells neben das Objekt folgt ein erneutes aufnehmen durch beidhändiges Greifen mit Zufassungsgriff mittig am Objekt (3). Anschließend wird das Objekt vollständig aufgenommen (4) und letztlich in die finale Tragehaltung umgesetzt (5).
In dieser Form kann jedes Objekt einer Kategorie zugeordnet werden, die das jeweilige Greifen ein- oder beidhändig mit entsprechend Greifpunkten am Objekt sowie zugehöriger Greifart (Umfassungsgriff, Zufassungsgriff, Kontaktgriff, Finger oder Hand etc.) definiert. Ferner wurden entsprechende Greiffolgen, wie beispielhaft erläutert, beschrieben.

3.6.2 Werkzeughandhabung

Zur Beschreibung von Verrichtungen der Werkzeughandhabung wurden die Abläufe als Folgen von Teil-Verrichtungen beschrieben, wobei besonderes Augenmerk auf die Zielpose, d. h. der Ausrichtung des Werkers zum Applikationspunkt sowie auf die Trajektorie der werkzeugführenden Hand gelegt wurde.
Die Handhabung von Werkzeugen umfasst mehrere, aufeinander folgende Teilbewegungen, wobei neben der Aufnahme des Hilfsmittels vor allem die spezifischen Bahnbewegungen der Applikation am Wirkpunkt von Bedeutung sind. Bei den Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass sich dabei verschiedene Bestandteile identifizieren lassen. Zunächst wird das Werkzeug entlang des Zustellweges zum Wirkpunkt geführt. Die Körperausrichtung ist dabei durch eine Rotation um die z-Achse geprägt, so dass der Mensch nicht frontal zum Wirkpunkt steht.
Der Zustellweg und die daraus resultierende Körperstellung hängen sowohl von der Lage als auch von der Orientierung der Wirkstelle ab. Es existieren Umschlagzonen, an denen die Grundausrichtung und ggf. die ausführende Hand wechseln. Mit Hilfe des eingesetzten Probekörpers konnten die einzelnen Umschlagzonen in Abhängigkeit der Lage des Applikationspunktes ermittelt werden. So kann ein Werkzeug rechtshändig und linkshändig appliziert und unterschiedlich betätigt werden.
Nach dem Erreichen der Wirkstelle folgt die eigentliche, werkzeugspezifische Applikationsbewegung, etwa die lineare Zuführung beim Akkuschrauber oder die Rotation beim Handschrauben. Zusätzlich zu den Bewegungsbahnen wurden weitere Charakteristika eruiert, etwa Amplitude und mittlere Schlagzahl beim Hämmern oder Drehwinkel beim Handschrauben. Im Rahmen zweier studentischer Arbeiten wurden die in den Motion-Capture-Studien (vgl. Kapitel 3.3 und 3.4) gewonnenen Daten aufbereitet und ausgewertet (Geiler, 2010; Thiele, 2011).
Für Werkzeuge, die eine komplexere Geometrie und definierte Greif- und Arbeitspunkte haben, empfiehlt sich eine manuelle Definition dieser Punkte (Points of

Interest, POI). An dem in Abbildung 39 dargestellten Akkuschrauber wurden ein Greifpunkt und ein Arbeitspunkt (Tool-Center-Point) definiert. Anhand dieser POIs ist eine schnelle und exakte Simulation möglich, das Werkzeug wird korrekt gefasst und appliziert. Die notwendigen Trajektorien werden automatisch generiert.

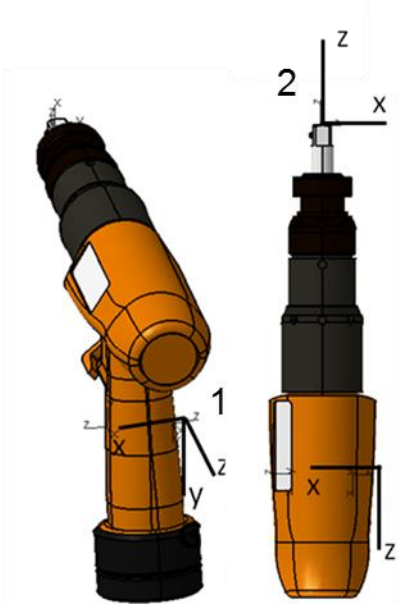


Abbildung 39 - Werkzeugmodell mit Greifpunkt (1) und Arbeitspunkt (2)

3.6.3 Allgemeine Untersuchungskritik

Anhand der diskutierten Untersuchungen und Ergebnisse zu menschlichen Bewegungen konnte eine Methodik zur Bewegungserfassung und -aufbereitung entwickelt und deren Machbarkeit exemplarisch überprüft werden. Insbesondere bei den folgenden Aspekten können jedoch noch Einschränkungen festgestellt werden:

- Diskursbereich
  Die Untersuchungen erfolgten auf Basis ausgewählter Verrichtungen und decken keinesfalls alle denkbaren Bewegungen, auch nicht im Kontext der manuellen Arbeit im Montagebereich, ab. Gleichwohl erfolgten umfassende Voruntersuchungen und theoretische Überlegungen, weshalb davon ausgegangen wird, dass die berücksichtigten Verrichtungen bereits einen Großteil üblicher Arbeitstätigkeiten abdecken. Zur Vervollständigung sind künftig weitere Studien unter Berücksichtigung der entwickelten Methodik durchzuführen.

- Probandenkollektiv
  Die Aufnahmen wurden zunächst mit drei Laien, später mit nur einem geübten Werker durchgeführt, weshalb keine statistische Absicherung der Ergebnisse gewährleistet ist. Um dennoch eine hohe Datenqualität zu erzielen, erfolgten entsprechende Vorüberlegungen anhand von Planerwissen zur üblichen

Arbeitsweise einerseits und die Etablierung des Simulationstages andererseits. Weiterhin fokussieren die Studien auf die Entwicklung eines Planungswerkzeuges, weshalb ohnehin von einer Planbewegung ausgegangen werden soll, was in frühen Planungsphasen zur Absicherung zunächst genügt.

- Versuchsdesign
  Die Ausführung erfolgte unter Laborbedingungen sowie unter arbeitsähnlichen Verhältnissen, nicht aber in echter Arbeitsumgebung. Außerdem wurden die Verrichtungen isoliert an Versuchsständen durchgeführt. Die Gestaltung der Versuchsstände berücksichtigte jedoch viele Aspekte realer Bedingungen, weshalb die Qualität für die Bewegungserfassung als ausreichend eingeschätzt wurde.

3.6.4 Zusammenfassung

Aus den im Rahmen der Motion-Capture-Studien gewonnenen Daten wurden unter Anwendung der in Kapitel 3.5 entwickelten Methode zur Bewegungserfassung und -aufbereitung idealtypische Bewegungsmuster der Handhabung von Werkstücken und Werkzeugen abgeleitet. Im Rahmen dreier studentischer Arbeiten wurden die gewonnenen Daten umfassend aufgearbeitet und exemplarisch Bewegungs-Algorithmen der Werkstück- und Werkzeughandhabung beschrieben. Diese wurden im Rahmen des Projektes eMAN weiterverarbeitet und flossen in die Entwicklung einer Software zur digitalen Menschsimulation ein (vgl. Kapitel 5.1). Es konnte gezeigt werden, dass menschliche Bewegungen mit Hilfe von Algorithmen beschrieben und auch generiert werden können, wobei die humanmotorische Richtigkeit gewährleistet ist. Die gewonnenen Erkenntnisse zur Handhabung von Objekten sind insofern neuartig, da sie bislang im Rahmen der Arbeitsplanung vernachlässigt wurden, weil es sich um Facharbeiter-Fertigkeiten handelt, die keiner näheren Erklärung bedürfen. In der konventionellen Arbeitsplanung erfolgt Bewegungsbeschreibung allein unter zeitwirtschaftlichen Aspekten sowie im Kontext der Belastungsprognose. Der für die simulative Planungsabsicherung notwendige Detaillierungsgrad wird erst durch die beschriebene feingranulare, algorithmische Bewegungsbeschreibung erreicht. Daraufhin kann nun eine ganzheitliche Ergonomiebewertungsmethode angewandt werden, um auf Basis erstellter Simulationen Vorhersagen zur späteren Belastung an den Arbeitsplätzen vornehmen zu können.

4 Anwendung einer Methode zur Ergonomiebewertung für digitale Menschmodelle

Die Simulation mit digitalen Menschmodellen erfolgt grundsätzlich zum Zweck der Visualisierung und Plausibilisierung geplanter Arbeitsabläufe und -umgebungen. Die ergonomische Bewertung des Arbeitsplatzes und des Arbeitsprozesses soll ein integraler Bestandteil des zu entwickelnden Simulationswerkzeugs sein. Nach der endgültigen Berechnung des Bewegungsablaufes (mit allen Restriktionen, z. B. geometrischen Behinderungen der Pfade) kann eine Bewertung der Verrichtungen erfolgen, die dem Nutzer hilft, diese einzuschätzen und gegebenenfalls ergonomisch ungünstige Verrichtungen durch günstigere zu ersetzen. Die Ergonomieabsicherung mit Hilfe digitaler Menschsimulationen umfasst dabei zwei Stufen.

Zunächst ist die bloße 3D-Visualisierung an sich bereits ein sehr wirkungsvoller Absicherungsumfang, denn so lässt sich zunächst die Ausführbarkeit einer Arbeitsaufgabe sicherstellen. Grobe Fehler der Arbeitsplatzgestaltung können frühzeitig erkannt und korrigiert werden. Die zweite Stufe der Ergonomieabsicherung ist die Beurteilung des simulierten Prozesses mittels einer Methode zur Belastungsbeurteilung. In der betrieblichen Praxis werden vermehrt Verfahren benutzt, welche derzeit nicht zum Funktionsumfang der etablierten Software-Lösungen gehören. Um eine Durchgängigkeit der Ergonomiebewertung in allen Phasen des Produkt-Entstehungs- und Herstellungsprozesses sicherzustellen, sind diese fehlenden Methoden für die Belastungsprognose in die Programme zur digitalen Menschsimulation zu implementieren.

Obgleich es zu den Zielen des Forschungsprojekts eMAN gehört, eine neuartige Methode zur Belastungsbewertung zu entwickeln (vgl. Kapitel 1.4), gilt es zunächst einmal, ein in der Praxis bereits etabliertes und angewandtes Verfahren derart in die Software zu implementieren, dass mit wenig Aufwand die gewohnte, also bislang manuell bzw. aus anderen Software-Werkzeugen bekannte Ergebnisdarstellung erzeugt werden kann.

Das Konzept zur Umsetzung einer Ergonomiebewertungsmethode für ein digitales Menschmodell wurde in Teilen bereits publiziert (Jendrusch, Pirger, & Fritzsche, 2011; Jendrusch, et al., 2011; Fritzsche, et al., 2011; Jendrusch, 2012).

4.1 Auswahl einer Methode und Prüfung auf Umsetzbarkeit

4.1.1 Anforderungen und Auswahl einer Methode

Das zu implementierende Verfahren zur Ergonomiebewertung sollte arbeitswissenschaftliche Qualitätskriterien erfüllen und grundsätzlichen Praxisanforderungen genügen. Dies umfasst insbesondere die folgenden Kriterien (Fritzsche, 2010; Lins & Britzke, 2010):

- Vollständigkeit der Risikobewertung (berücksichtigte Risikofaktoren)
  Nach Möglichkeit sollte die Methode eine umfassende Risikobeurteilung mehrerer Belastungsfaktoren ermöglichen, weshalb insbesondere Kombinationsverfahren in Betracht kommen. Bspw. sollten sowohl ungünstige Körperhaltungen als auch Aktionskräfte oder manuelle Lastenhandhabungen berücksichtigt werden.

- Konformität mit Standards
  Die ausgewählte Methode sollte aktuellen, als gesichert erachteten arbeitswissenschaftlichen Erkenntnissen entsprechen. Die Validität des Verfahrens sollte durch entsprechende wissenschaftliche Untersuchungen bestätigt sein. Eine Konformität mit gültigen Normen und Richtlinien stellt dies sicher.

- Zeitlicher Aufwand
  Die Methode sollte ohne großen zusätzlichen Zeitaufwand durchführbar sein, um die von Praktikern im betrieblichen Alltag zumeist gewünschten raschen Prognosen und Variantenvergleiche zu ermöglichen. Die spricht wiederum für ein Screening-Verfahren, welches eben auf diese Anforderung fokussiert.

- Genauigkeit
  Die Detailliertheit sollte möglichst hoch sein, um exakte Belastungsprognosen und Variantenvergleiche zu ermöglichen. Das bedeutet, die beinhalteten Risikofaktoren sollten möglichst genau erfasst werden.

- Notwendige Expertise
  Es sollte sich um Verfahren handeln, welches keine vertiefte Expertise zur Anwendung und Interpretation der Ergebnisse erfordert, so dass die spätere Anwendbarkeit für die Software-Nutzer gegeben ist.
  Folglich kommen vorwiegend Screening-Verfahren in Frage, da sie den geschilderten Anforderungen weitgehend entsprechen.

- Praxisverbreitung und Akzeptanz
  Letztlich sollte es sich um ein Verfahren handeln, welches in der betrieblichen Praxis entsprechend verbreitet ist, also bereits für Bewertungen verwendet wird. Damit wird eine Durchgängigkeit der Ergonomiebetrachtungen im Verlauf des PEP wie auch im Serienbetrieb gewährleistet, d. h. Ergebnisse ergonomischer Beurteilungen aus der Planungsphase sind mit Bewertungen in der Serienproduktion an realisierten Arbeitsplätzen vergleichbar.

Tabelle 5 zeigt einen Überblick in der Praxis üblicher Ergonomiewerkzeuge zur Beurteilung physischer Belastungen und deren Erfüllung der erläuterten Anforderungen.

Tabelle 5 - Vergleich praxisüblicher Ergonomiewerkzeuge hinsichtlich des Funktionsumfangs und der Anwendbarkeit (Fritzsche, 2010; Lins & Britzke, 2010)

Werkzeugabkürzung	**SAK**	**OWAS**	**BSVS**	**NIOSH**	**RULA**	**LMM**			**OCRA**	**AAWS**	**EAWS**
						HHT	**ZS**	**MP**			
Bezeichnung	System zur Analyse von Körperhaltungen	Ovako Working Posture Analysing System	Burandt/Schultetus/VDI/Siemens Granzlast- bzw. Grenzkraftverfahren	National Institute for Occupational Safety and Health Revised Lifting Equation	Rapid Upper Limb Assessment	Leitmerkmalmethode Heben/Halten/Tragen	Leitmerkmalmethode Ziehen/Schieben	Leitmerkmalmethode Manuelle Arbeitsprozesse	Occupational Risk Assessment	Automotive Assembly Worksheet	European Assembly Worksheet
Entstehung	1970	1977	1978	1991	1993	2001	2002	2007	2002	2004	2006
Risikofaktoren											
ungünstige Körperhaltungen	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
manuelle Lastenhandhabung			X	X		X	X	X		X	X
repetitive Tätigkeiten					X			X	X		X
hohe Aktionskräfte			X		X			X	X	X	X
Gelenkstellungen obere Extremitäten			X		X			X	X	X	X
ungünstige Ausführungsbedingungen						X	X	X		X	X
Geschlechtsdifferenzierung			X			X	X	X		X	X
Arbeitsdauer			X			X	X	X	X	X	X
Pausensystem									X		X
Anwendung											
Konformität mit Standards	1	1	2	5	3	5	5	3	3	5	5
zeitlicher Aufwand	2	3	4	3	4	1	1	1	5	4	4
Genauigkeit	3	5	3	5	5	1	1	1	5	3	3
Notwendige Expertise	2	2	3	3	3	2	2	2	5	4	5
Praxisverbreitung und Akzeptanz	1	2	2	4	4	5	5	5	3	5	5

Legende:

Quantitative Ausprägung des Kriteriums: 1: sehr gering…5: sehr hoch

Qualitative Ausprägung des Kriteriums:	
	unzureichend
	sehr gut

Es stellt sich heraus, dass EAWS über den umfangreichsten Fundus an Risikofaktoren verfügt und hinsichtlich Konformität mit Standards sowie Praxisverbreitung positiv hervorsticht. Jedoch sind der zeitliche Aufwand sowie die notwendige Expertise sehr hoch. Diese Defizite sind aber bei einer weitgehend automatisierten Bewertung durch das Simulationswerkzeug weniger relevant, da der Aufwand nicht manuell erfolgt. Darüber hinaus ist EAWS das Standard-Werkzeug zur Beurteilung physischer Belastungen in der im Fachbeirat des Forschungsprojektes eMAN vertretenen MTM-Vereinigung sowie der Volkswagen AG (Toledo Muñoz, 2012; Jacob, Toledo Muñoz, Busche, & Jendrusch, 2010). Folglich wurde EAWS als zu implementierende Methode zur Ergonomiebewertung ausgewählt. Die daraus resultierende Anforderungen und zu beachtenden Rahmenbedingungen werden im Folgenden erläutert.

Um eine plausible Ergonomieprognose mit EAWS zu ermöglichen, müssen drei zentrale Ebenen bei der Modellierung korrekt umgesetzt werden:

- Prozessmodellierung (Arbeitsablauf, Vorgabezeit, Häufigkeiten…)
- Belastungsfaktoren (Körperhaltungen, Kräfte, Lastgewichte…)
- Rahmenbedingungen (Taktzeit, Ausbringung, Arbeitszeitmodell…)

Zunächst ist der zu beurteilende Prozess als solcher richtig zu modellieren, d. h. der Ablauf muss in der richtigen Reihenfolge, im real-getreuen Layout, zeitrichtig und mit den richtigen Baugruppen und Hilfsmitteln abgebildet werden. Problematisch ist, dass eine fehlerhafte Modellierung der Posen und Bewegungen zu falschen Schlussfolgerungen führen kann. Nicht immer ist die biomechanische Korrektheit manuell erstellter Körperhaltungen gegeben (etwa Nichteinhaltung von Gleichgewichtsbedingungen, übertriebene Gelenkigkeit des Menschmodells). Eine wichtige Voraussetzung ist deshalb die humanmotorische Richtigkeit der menschlichen Bewegungen, d. h. die synthetisierten Bewegungen müssen denen entsprechen, die ein geübter und eingearbeiteter Facharbeiter unter normalen Umständen ausüben würde. Dies gewährleistet, dass die Basis der Ergonomiebewertung, nämlich die modellierten Posen, plausibel und biomechanisch korrekt ist, was valide Risikoabschätzungen ermöglicht. Neben der Intensität von Belastungen ist die Zeitkomponente für die umfassende ergonomische Bewertung relevant. Hier ist bei konventioneller Menschmodellierung mit Ungenauigkeiten zu rechnen, insbesondere wenn zahlreiche Zwischenposen erstellt werden, um schlüssige Bewegungsabläufe zu erzielen. Dann ist mit erhöhter Ablaufzeit zu rechnen. Andererseits können auch sehr schnelle, biomechanisch gar unmögliche Bewegungen simuliert werden. Ein praktikabler Ansatz ist die Simulationen auf Basis eines Systems vorbestimmter Zeiten, so dass sich planerisch korrekte Ablaufzeiten ergeben, womit auch die Dauer der Belastungen für die Ergonomiebewertung verwendet werden kann.

In der Praxis erfolgt eine Ergonomiebewertung im Regelfall auf Basis von Beobachtungen verschiedener Mitarbeiter. Anderseits soll die Vergleichbarkeit gesichert werden, indem eine standardisierte Bewertungsbasis zu Grunde gelegt wird (Geschlecht, Perzentil etc.). Ein Skalieren der Beobachtungen auf eine solche Vergleichsbasis ist für den Anwender schwierig. Die anthropometrischen Daten digitaler Menschmodelle können hingegen rasch angepasst werden, so dass einerseits Analysen mit vergleichbarer Basis durchgeführt und andererseits unterschiedliche Populationen simuliert werden können. Dies wirkt sich unmittelbar auf die zweite Ebene, nämlich die Modellierung der Belastungsfaktoren aus. Das Simulationsmodell muss die in der Bewertungsmethode berücksichtigten Risikofaktoren umfassen und richtig abbilden. So müssen die Körperstellungen eben denen der realen Arbeitspopulation entsprechen und weitere Faktoren wie Kräfte oder Lasten müssen ebenfalls Bestandteil des Modells sein. Insbesondere komplexe Kinematiken und Interaktionen mehrerer Menschmodelle oder zwischen Menschmodellen und technischen Ressourcen müssen realitätsgetreu modelliert werden. So kann ein Arbeiten an sich bewegenden Objekten nur dann automatisch erkannt werden, wenn es in der Simulation tatsächlich stattfindet. Andernfalls ist eine manuelle Eingabe anhand des Planerwissens notwendig. Eine solche Eingabemöglichkeit ist demnach vorzusehen.
Schließlich sind auch die organisatorischen Planungsprämissen im Modell zu dokumentieren, da sich Taktzeit, Schichtleistung und Pausengestaltung auf die Bewertung auswirken.

4.1.2 Prototypische Umsetzung

Bevor EAWS für die Auswertung digitaler Menschsimulationen zum Einsatz kommen kann, muss zunächst sichergestellt werden, dass das Verhalten des realen Systems, in diesem Fall also die Verrichtung der Arbeit durch Menschen, im modellierten System hinreichend genau wiedergegeben wird (Kühn, 2006). Es stellt sich die Frage, inwieweit die Simulation auf Basis von Planungsdaten gültige (valide) Prognosen der Ergonomiebewertung zulässt. Hierfür wurde im Vorfeld untersucht, ob zwischen den Bewertungsergebnissen bereits realisierter Arbeitsplätze und korrespondierenden Simulationen eine ausreichende Übereinstimmung vorliegt. Anhand einer Stichprobe von 20 Arbeitsplätzen konnte dabei nachgewiesen werden, dass insgesamt eine gute Übereinstimmung zwischen den Bewertungen realer und simulierter Arbeitsplätze besteht, gleichwohl aber Unterschiede zwischen den Belastungsfaktoren bestehen. So lassen sich Körperhaltungen sehr gut abbilden, Aktionskräfte hingegen erweisen sich als schwierig (Fritzsche & Jendrusch, 2009).

In einer weiteren Vorstudie wurde untersucht, ob ein umgekehrter Ansatz, nämlich die Visualisierung einer Prozessbeschreibung aus kombinierten Zeit- und

Ergonomieinformationen, möglich ist. Aus diesen Daten konnten in einem Demonstrator die zu erwartenden Bewegungen im Zeitverlauf abgebildet werden (Abbildung 40). Ausgehend von einer MTM-UAS-Analyse, ergänzt um Informationen zu den Körperhaltungen während der Prozessschritte (in der Abbildung oben tabellarisch dargestellt), wurde eine Visualisierung mit digitalem Menschmodell abgeleitet. Die farbliche Hervorhebung von Körpersegmenten, welche jeweils kritische Gelenkwinkel innehaben, dient der Identifizierung potentieller Überbelastungen.

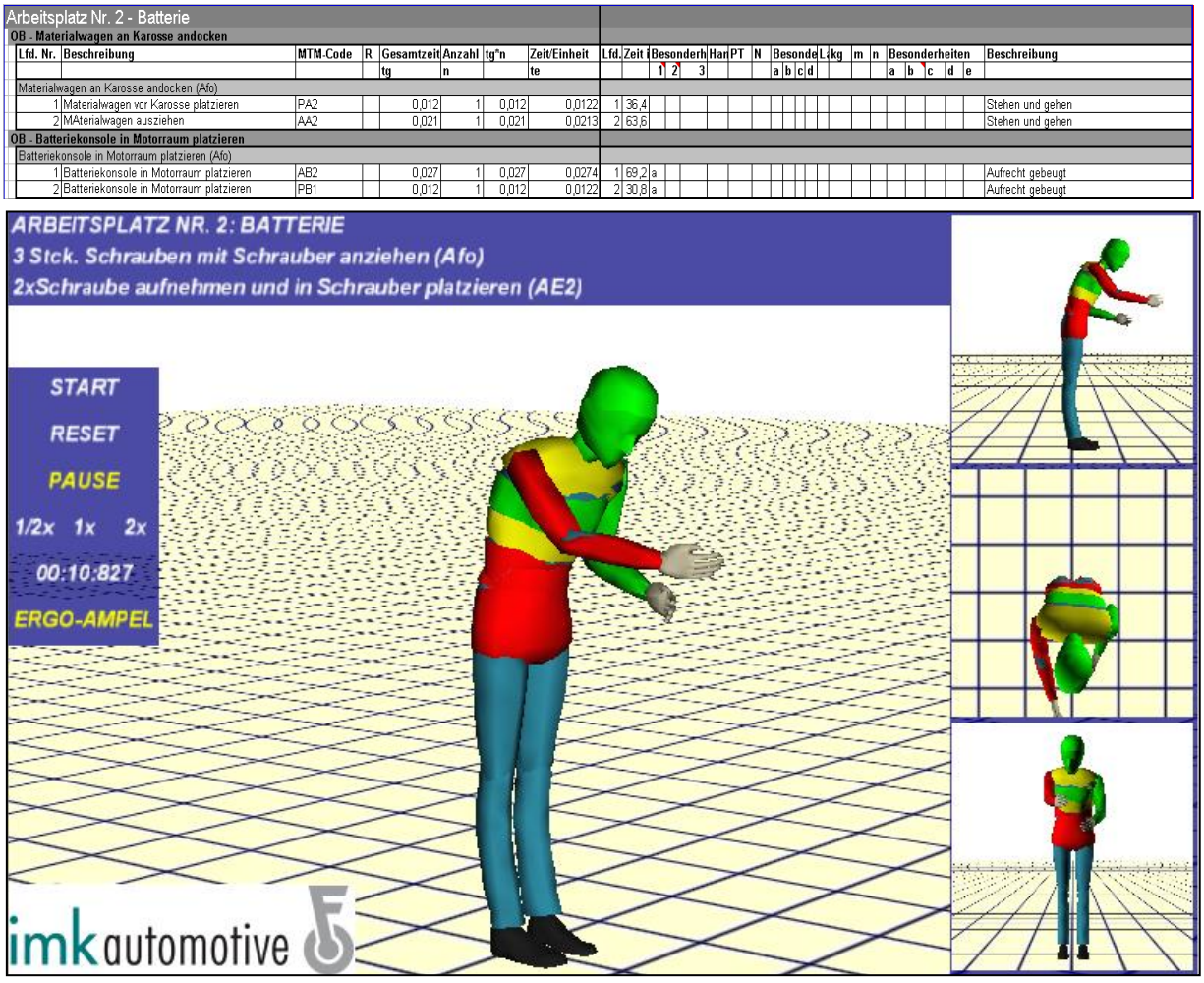

Arbeitsplatz Nr. 2 - Batterie
OB - Materialwagen an Karosse andocken
Lfd. Nr. | Beschreibung | MTM-Code | R | Gesamtzeit tg | Anzahl n | tg*n | Zeit/Einheit te | Lfd. | Zeit | Besonderh 1 2 3 | Han | PT | N | Besonde a b c d | L | kg | m | n | Besonderheiten a b c d e | Beschreibung
Materialwagen an Karosse andocken (Afo)
1 | Materialwagen vor Karosse platzieren | PA2 | 0,012 | 1 | 0,012 | 0,0122 | 1 | 36,4 | Stehen und gehen
2 | MAterialwagen ausziehen | AA2 | 0,021 | 1 | 0,021 | 0,0213 | 2 | 63,6 | Stehen und gehen
OB - Batteriekonsole in Motorraum platzieren
Batteriekonsole in Motorraum platzieren (Afo)
1 | Batteriekonsole in Motorraum platzieren | AB2 | 0,027 | 1 | 0,027 | 0,0274 | 1 | 69,2 | a | Aufrecht gebeugt
2 | Batteriekonsole in Motorraum platzieren | PB1 | 0,012 | 1 | 0,012 | 0,0122 | 2 | 30,8 | a | Aufrecht gebeugt
ARBEITSPLATZ NR. 2: BATTERIE
3 Stck. Schrauben mit Schrauber anziehen (Afo)
2xSchraube aufnehmen und in Schrauber platzieren (AE2)
START
RESET
PAUSE
1/2x 1x 2x
00:10:827
ERGO-AMPEL
imkautomotive

Abbildung 40 - Prototypische Visualisierung kombinierter Zeit- und Ergonomieanalysen

Bei dieser Darstellung fehlen jedoch sämtliche Umgebungsinformationen und Interaktionsobjekte. Dennoch konnten bereits anhand der textlichen Beschreibung des Arbeitsschrittes und den zugehörigen Körperstellungen im Zeitverlauf Hinweise zur Gestaltungsqualität des Arbeitsplatzes gewonnen werden.

Fritzsche (2010) beschreibt eine prototypische Umsetzung einer AAWS-Bewertung für das Menschmodell Human Builder (Abbildung 41). Wie in der Abbildung auf der linken Seite erkennbar ist, erfolgt eine automatische Erkennung sowie Bepunktung

der AAWS-Körperhaltungskategorien. Diese basiert ausschließlich auf Gelenkwinkeln des digitalen Menschmodells. Bei Tests wurden Posen im Zeitverlauf überwiegend korrekt erkannt, wenngleich fehlerhafte Zuordnungen vorkamen. Insbesondere erwies sich die Unterscheidung zwischen Sitzen und Hocken als problematisch sowie die Differenzierung der Armhaltung in Relation zum Rumpf. Für die Berechnung von Kräften und Lasten ist lediglich eine manuelle Dateneingabe und anschließende Berechnung der Punkte möglich, weitere notwendige Prozessinformationen werden der Simulation nicht automatisch entnommen. Extrapunkte wurden nicht berücksichtigt. Trotz der bestehenden Defizite zeigt sich, dass es möglich ist, eine teilweise automatisierte Ergonomiebewertung mit einem Kombinationsverfahren wie AAWS für digitale Menschsimulationen möglich ist. Allerdings sind die bloßen Gelenkwinkelinformationen im Zeitverlauf nicht ausreichend.

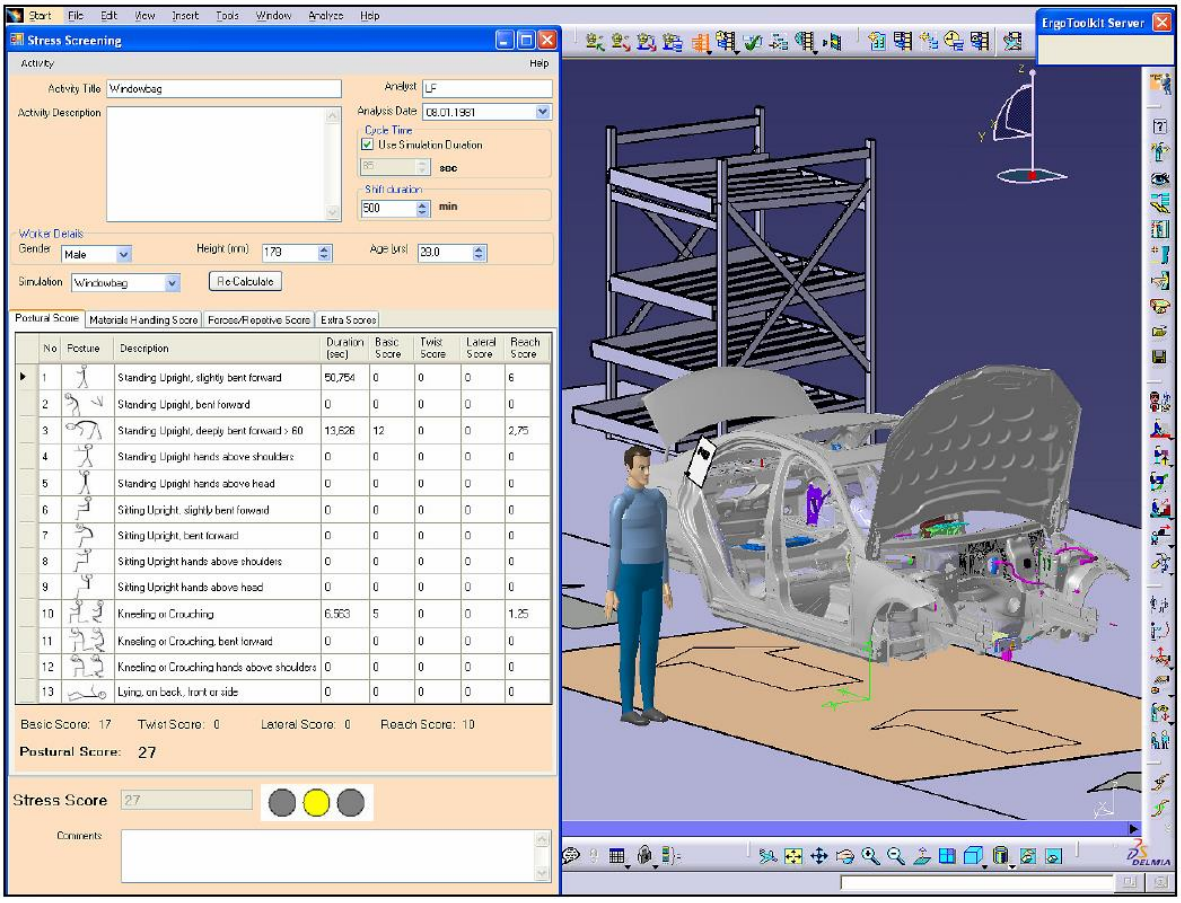


Abbildung 41 - Prototypische AAWS-Bewertung für das Menschmodell Human Builder (Fritzsche, 2010)

Um eine vollständige EAWS-Bewertung mit möglichst wenig Aufwand zu ermöglichen, eignet sich eine semiautomatische Lösung, d. h. der Großteil der Informationen sollte direkt der Simulation automatisch entnommen werden können, lediglich wenige fehlende Angaben sollten manuell ergänzt werden müssen. Das in Kapitel 3.1 beschriebene Verrichtungskonzept gewährleistet eine eindeutige und

fehlerfreie Erkennung der Körperstellungen im Zeitverlauf, da insbesondere schwierig erkennbaren Posen wie Knien oder Sitzen die jeweils entsprechende Verrichtung Hinknien oder Hinsetzen vorausgeht. Nach dem Setzen folgt demnach eine sitzende Grundkörperhaltung. Die Verrichtungen beinhalten weitere Informationen, welche zur EAWS-Bewertung benötigt werden, bspw. geht einer manuellen Lastenhandhabung das Aufnehmen der Last voraus.

4.1.3 Zusammenfassung

Anhand des Vergleichs etablierter Ergonomiebewertungsmethoden wurde EAWS als zu implementierendes Verfahren ausgewählt, da es arbeitswissenschaftliche Qualitätskriterien erfüllt und grundsätzlichen Praxisanforderungen genügt. Vor allem in der Automobilindustrie, etwa in der Volkswagen AG, wird EAWS standardmäßig während des gesamten PEP eingesetzt.
Notwendige Voraussetzung für eine korrekte Ergonomiesimulation ist die richtige Modellierung des Prozesses einschließlich der Belastungsfaktoren und Rahmenbedingungen. Anhand von Voruntersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass simulative Ergonomiebewertung mit EAWS möglich ist. Durch die Nutzung des entwickelten Verrichtungskonzeptes lässt sich eine semiautomatische Bewertung realisieren.

4.2 Umsetzung

Die Realisierung einer semiautomatischen Ergonomiebewertung für digitale Menschsimulationen auf Basis des EAWS (Anlage 4) wird im Folgenden, getrennt nach den einzelnen Modulen der Methode, erläutert. Die Umsetzung basiert auf EAWS Version 1.3.2c (Institut für Arbeitswissenschaft Darmstadt IAD, 2009; Baracco, et al., 2009). Zunächst wird jeweils das Modul erläutert, anschließend werden sowohl die Herausforderungen und Hemmnisse einer automatisierten Erfassung aus digitalen Menschsimulationen als auch das letztendliche Konzept zur Realisierung diskutiert. Die Darstellungen beziehen sich auf die erfolgte Umsetzung für die Simulationssoftware Editor menschlicher Arbeit (ema, vgl. Kapitel 1.4, 5.1)

4.2.1 EAWS Modul 1: Körperstellung

Beschreibung des Moduls
Das Modul umfasst die Zeilen 1 bis 16 des EAWS-Formblattes. Mit Modul 1 werden statische Körperhaltungen, d. h. Körperhaltungen mit einer jeweiligen Dauer von mindesten 4s, sowie hochfrequente Bewegungen des Rumpfes und der Arme bewertet. Hochfrequent bedeutet mindestens zwei extreme Beugungen des Rumpfes pro Minute (Formblatt: Zeilen 4, 12, 13) oder mindestens zehn extreme Armbewegungen pro Minute (Formblatt: Zeilen 5, 6, 10, 11, 14, 15).

Geringe manuell zu handhabende Lasten (<3kg), Fingerkräfte (<30N) bzw. Ganzkörperkräfte (<40N) sind in der Bewertung im EAWS-Modul 1 bereits enthalten.
EAWS bietet zur Haltungseinstufung in Modul 1 qualitativ beschreibende Piktogramme, ergänzt um Gelenkwinkelangaben für die Rumpfbeugung bzw. -neigung sowie relative Verhältnisangaben zur Armstreckung. Die Piktogramme bestehen dabei aus wenigen Segmenten:

- Kopf,
- Rumpf,
- Arm in zwei Teilen und
- Beine in drei Teilen.

Die Module 1, 2 und 3 schließen sich grundsätzlich gegenseitig aus, d. h. eine belastende Tätigkeit wird entweder als Körperhaltung, Aktionskraft oder Lastenhandhabung bewertet, eine mehrfache Berücksichtigung ist nicht zulässig. Dennoch ist in Modul 1 die gesamte Dauer des Arbeitszyklus zu bewerten, dafür erfolgt die Zuordnung sämtlicher Zeitanteile die entweder als nicht statisch bzw. hochfrequent identifiziert oder in den Modulen 2 und 3 bewertet wurden zu einer jeweils für den Arbeitsplatz typische Grundkörperhaltung.

Umsetzung zur automatischen Bewertung

Die Herausforderung einer automatisierten Bewertung von EAWS-Modul 1 für ein digitales Menschmodell besteht in der korrekten Zuordnung der komplexen möglichen Körperstellungen, die mit einem digitalen Menschmodell modelliert werden können, zur vereinfachten Darstellung in EAWS-Formblatt. Nicht alle Körperhaltungen können allein anhand der Gelenkwinkel exakt zugeordnet werden (vgl. Kapitel 4.1.2, prototypische AAWS-Bewertung für das Menschmodell Human Builder). Die zehn im Regelwerk formulierten Anwendungsregeln zu Modul 1 sind algorithmisch in die Berechnungsvorschrift zu implementieren. Dabei sind manuelle Eingaben notwendig. So wird eine Grundkörperhaltung zur Bewertung des Arbeitsplatzes benötigt, welche bei stehender Körperhaltung von den Abmessungen und theoretisch möglichen Laufwegen abhängt. Mittels Eingrenzung des Arbeitsplatzes im 3D-Layout könnte dies automatisch erkannt werden, ein praktikabler Ansatz ist jedoch die Festlegung mittels Checkbox. Ohnehin muss der Anwender einige, für die Punktberechnung notwendige Parameter zum Arbeitsplatz eingeben. Dies sind die Plantaktzeit sowie die Anzahl der Takte je Schicht bzw. die Netto-Schichtdauer.
Es bedarf zunächst einer Transformation der sehr einfachen Segmentierung der Piktogramme auf die komplexere Struktur eines digitalen Menschmodells. Dabei muss das Menschmodell analog der Piktogramme in einzelne Funktionseinheiten aufgeteilt werden, wobei jeweils mehrere Freiheitsgrade kombiniert werden müssen.

Abbildung 42 verdeutlicht dies am Beispiel des digitalen Menschmodells Human Builder. Hier lässt sich ein Beugen des Rumpfes relativ zu den Beinen über mehrere Gelenke realisieren (zweifach in der Wirbelsäule sowie einfach im Becken), wobei auch gegensätzliche Ausrichtungen der einzelnen Gelenke möglich sind, z. B. Ausprägen eines Hohlkreuzes. Für die Adaption auf die vereinfachte Darstellung im EAWS-Piktogramm wird daher ein Gesamtwinkel zwischen den Geraden von der Hüfte zur Schulter und der Vertikalen durch den Hüftpunkt benötigt.

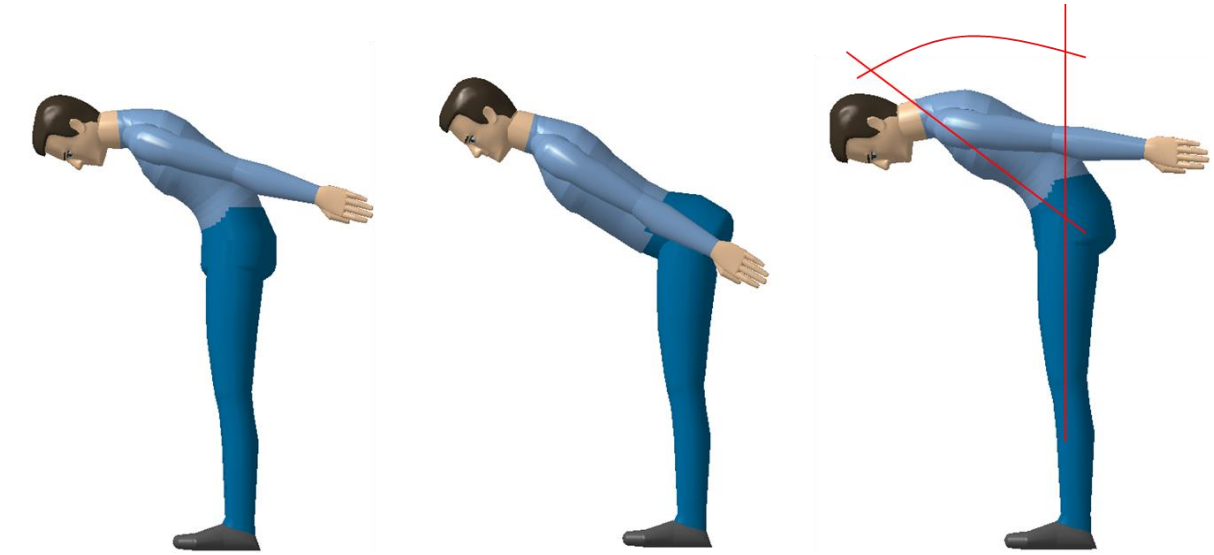


Abbildung 42 - Möglichkeiten der Rumpfbeugung für das Menschmodell Human Builder

Ferner müssen Marker am Menschmodell definiert werden, um die Relativpositionen einzelner Körpersegmente zueinander, etwa der Arme zu Schulter und Kopf, erkennen zu können. Als notwendige Marker werden die Positionen der Schultern, der Hände sowie der Augen erfasst (Diagramm Abbildung 43). Die x-Achse repräsentiert dabei den Zeitverlauf, die y-Achse die absolute Höhe des jeweiligen Markers. Für jeden Marker ist ein Graph aufgetragen. Mit diesen Markern werden die Körperstellungen der EAWS-Zeile 5: aufrecht, Arme auf/über Schulterhöhe sowie der Zeile 6: aufrecht, Arme über Kopfhöhe erfasst, ebenso die korrespondierenden Körperhaltungen im Sitzen oder Hocken/Knien. Die Kopfhöhe ist dabei als Höhe der Augen definiert. Sobald also ein Handmarker über dem der Augen ist, wird Zeile 6 bewertet. In Abbildung 43 ist bspw. zum Zeitpunkt t=63s zu erkennen, dass der Marker der linken Hand sich kurzzeitig über der Schulter befindet, so dass hier die Körperhaltung aufrecht, Arme auf/über Schulterhöhe erkannt wird.

Vereinzelt ist die Zuordnung zu einer Körperstellung auf alleiniger Basis der Gelenkinformationen und Markerpositionen nicht eindeutig. So können bspw. bei sitzender Körperhaltung auf einem Montagehocker die Beine derart seitlich am Körper sein, dass die Gelenkstellungen dem Hocken gleichen. Hier hilft die Modellierungsmethodik auf Basis von Verrichtungen, denn den entsprechenden Körperhaltungen geht jeweils die passende Körperbewegung als Verrichtung voraus,

d. h. vor jedem Sitzen gibt es eine Bewegung Hinsetzen. Somit ist eine eindeutige Zuordnung der Körperhaltungen sichergestellt. Es wird die grundlegende Art der Körperhaltung, also Stehen, Sitzen, Hocken/Knien jeweils anhand der Verrichtungen zugeordnet, die Positionen der Marker und die Gelenkwinkel werden zur exakten Zuordnung der jeweiligen Ausprägung, wie aufrecht oder gebeugt, verwendet.

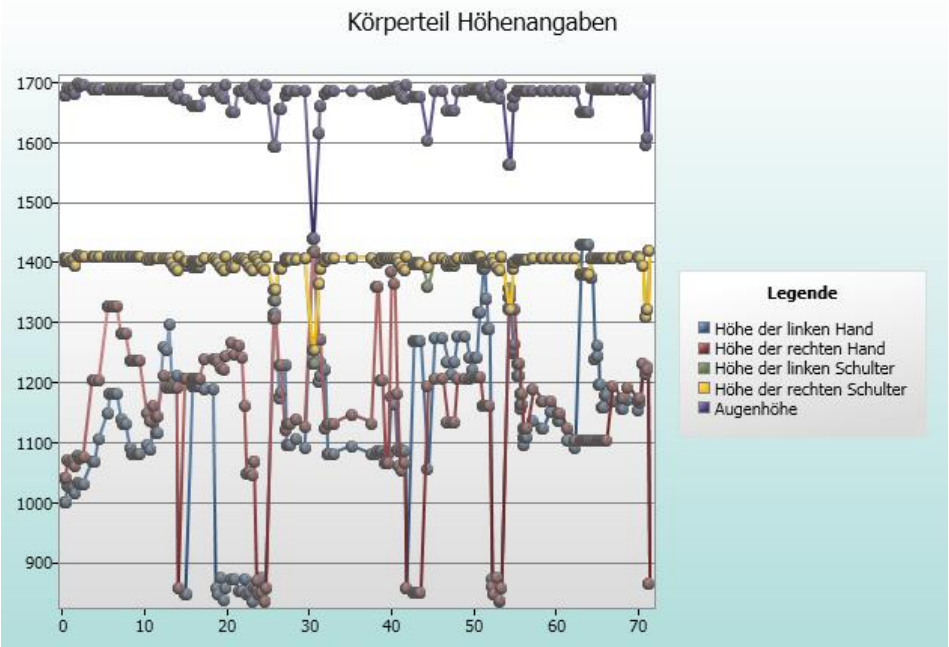


Abbildung 43 - Höhen der Körperteilmarker im Zeitverlauf

Neben der Identifizierung der jeweiligen Posen ist ferner der Zeitaspekt von Bedeutung. Hierfür müssen die Körperhaltungsklassen im gesamten Zeitverlauf erfasst werden. Abbildung 44 zeigt auszugweise die tabellarische Darstellung der Körperhaltungen im Zeitverlauf einer Simulation. Es wird jeweils die tatsächlich identifizierte und die gemäß Regelwerk bewertete Körperhaltung angezeigt. Im dargestellten Beispiel ist etwa in den Zeilen 316 und 317 die Körperhaltung der EAWS-Zeile 14: Knien oder Hocken, Arme auf/über Schulterhöhe erkannt worden, Da die Dauer der Körperhaltung jedoch unter vier Sekunden liegt, wird die Grundkörperhaltung Zeile 1: Stehen und Gehen bewertet.

Als Stärke der automatisierten Bewertung erweist sich insbesondere die sehr exakte Berücksichtigung der asymmetrischen Körperhaltungen. Rumpfdrehung, und -neigung sowie die Reichweite der Arme werden stets korrekt erkannt und bewertet.

#	Dauer [s]	KH (erkannt)	KH (bewertet)	Start [s]	Ende [s]	(Körper-)Abstützung	Rumpfdrehung [°]	Rumpfneigung [°]	Reichweite [%]
316	0.522	14	1	108.326	108.848	☐	18.47	17.98	46.19
317	0.547	14	1	108.848	109.395	☐	18.47	17.98	46.19
318	1.148	1	1	109.395	110.543	☐	0.00	0.00	0.00
319	0.084	1	1	110.543	110.628	☐	0.00	0.00	0.00

Abbildung 44 - Tabellarische Darstellung der Körperhaltungszwischenwerte im System ema

Die Bepunktung erfolgt anhand der EAWS-Wertetabelle. Dabei sind im Bewertungsbogen die Zeitanteile am Gesamttakt in Klassen eingeteilt. Zur Berechnung werden die Mittelwerte der Klassen verwendet. Gemäß der EAWS-Methodik wird die Punktbewertung für Zwischenwerte des zeitlichen Anteils mittels linearer Interpolation zwischen den anliegenden Werten errechnet. Eine Extrapolation über die Maximalwerte hinaus findet nicht statt. Die Berechnung der Punkte erfolgt automatisiert.

4.2.2 EAWS Modul 2: Aktionskräfte

Beschreibung des Moduls

Im Modul 2, welches die Zeilen 17 und 18 im Formblatt umfasst, werden aufzubringende Aktionskräfte anhand der Intensität (Kraftbetrag [N] im Verhältnis zur Maximalkraft) und Dauer bzw. Häufigkeit bewertet. Dabei wird zwischen Finger- und Arm- bzw. Ganzkörperkräften unterschieden. Fingerkräfte von weniger als 30N bzw. Arm-/Ganzkörperkräfte von weniger als 40N werden nicht bewertet, die Belastung ist in diesen Fällen bereits in der Bewertung von Modul 1 enthalten.

Für die Maximalkräfte werden zwei Perzentile angegeben: P15 für Planungsanalysen sowie P40 für Ausführungsanalysen. Die maximal mögliche Fingerkraft ist abhängig von der Griffform, wobei zwischen fünf Möglichkeiten unterschieden wird. Die Ausübung der Kraft wird als einarmig angenommen. Bei Arm-/Ganzkörperkräften ist die Maximalkraft abhängig von der Grundkörperhaltung (Stehen, Knien, Sitzen) und der Kraftrichtung (sechs Richtungen). Weiterhin wird zwischen ein- und beidarmiger Kraftausübung unterschieden.

Die manuelle Bewertung von EAWS-Modul 2 ist, sofern unterschiedliche Kraftfälle an einem Arbeitsplatz auftreten, sehr rechenintensiv und damit fehleranfällig. Es müssen statische und dynamische Kraftfälle, sowie Kraftfälle mit unterschiedlichen Kraftniveaus durch Bildung gewichteter Mittelwerte und Interpolation letztlich zu jeweils einem Gesamtpunktwert für die Zeilen 17 und 18 zusammengefasst werden.

Umsetzung zur automatischen Bewertung

EAWS-Modul 2 liegen elf erläuternde Regeln zugrunde, welche algorithmisch umgesetzt werden müssen. Um eine weitgehend automatische Kraftbewertung zu realisieren, muss einer Simulation zunächst einmal entnommen werden können, ob eine Kraftausübung überhaupt stattfindet. Hierfür erweist sich das

Verrichtungskonzept erneut als hilfreich. Je nach Verrichtungstyp, der simuliert wird, z. B. Körperbewegungen, Werkzeughandhabung etc., wurde vordefiniert, ob eine Kraftausübung grundlegend sinnvoll bzw. möglich ist. Bei den entsprechenden Verrichtungen können nun Kraftwerte eingegeben werden (Abbildung 45, Dialog-Fenster der Simulationssoftware ema, vgl. Kapitel 5.1). Im Rahmen der Eingabe durch den Anwender werden bei der Simulationserstellung die notwendigen Parameter in Form von Eingabe-Dialogen abgefragt. Sofern nun eine Kraftaufbringung im Sinne des EAWS-Moduls 2 zu erwarten ist, wie etwa bei der in Abbildung 45 dargestellten Handhabung eines Werkzeuges, wird im Dialog der Kraftbetrag abgefragt. Alternativ ist auch eine standardisierte Vorbelegung von Verrichtungsbausteinen mit Kräften denkbar, um ein möglichst exaktes Risikoscreening auch in frühen Planungsphasen zu ermöglichen.

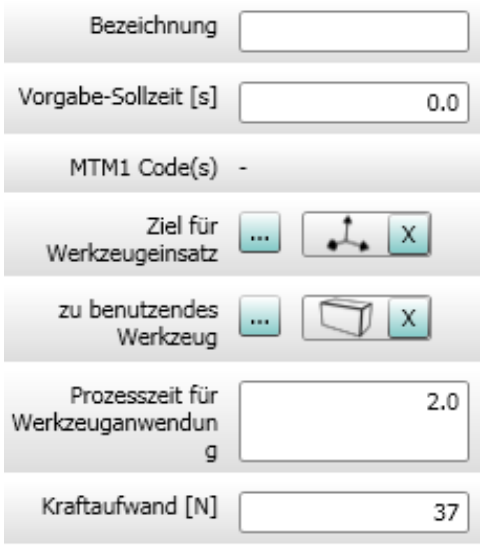


Abbildung 45 - ema-Eingabedialog für Verrichtungsparameter einschließlich Kraftaufwand

Die übliche Greif- bzw. Kopplungsausprägung wird den jeweiligen Verrichtungen bereits zugeordnet, z. B. der Zeigefinger bei der Verrichtung Knopfbetätigen oder der Umfassungsgriff beim Werkzeughandhaben. Bei Arm- bzw. Ganzkörperkräften ist die Bestimmung der Kraftwirkungsrichtung erforderlich, um die jeweils mögliche Maximalkraft bestimmen zu können. Diese Richtungsermittlung kann mittels der am Menschmodell definierten Marker erfolgen und muss nicht manuell definiert werden.
Die Belastung resultiert neben der Krafthöhe auch aus der Dauer bzw. Häufigkeit der Kraftausübung. Die Dauer kann der Simulationszeit der Verrichtung automatisch entnommen werden. Ist die Dauer der Verrichtung kürzer als 4s, wird entsprechend erkannt, dass es sich um einen dynamischen Kraftfall handelt. Sofern der Kraftaufwand nicht während der gesamten Verrichtung nötig ist, kann mittels einer zusätzlichen Selektion einer Checkbox definiert werden, dass es sich um einen dynamischen Kraftfall handeln soll. Die Häufigkeit ergibt sich wiederum automatisch aus der Anzahl der Verrichtungen.

Die Berechnung der Kraftpunkte erfolgt also insofern weitgehend automatisiert, dass letztlich nur der zu erwartende Kraftbetrag durch den Anwender festgelegt werden muss und die weiteren Parameter wie Greiftyp, Kraftrichtung oder Dauer/Häufigkeit automatisiert erkannt werden. Die vergleichsweise aufwendigen Berechnungen müssen nicht durch den Anwender ausgeführt werden, was hilft, Fehler zu verhindern.

4.2.3 EAWS Modul 3: Manuelles Handhaben von Lasten

Beschreibung des Moduls

In Modul 3 – im Formblatt die Zeile 19 – werden Belastungen durch manuelles Handhaben von Lasten bewertet. Die Belastung ist dabei anhängig vom Lastgewicht, der Körperhaltung und Position der Last sowie der Häufigkeit, Dauer oder Wegstrecke. Bei der Beurteilung der Lastgewichte erfolgt eine geschlechtsabhängige Differenzierung. Für Operationen, die das Ziehen oder Schieben von Lasten umfassen, können zusätzliche Ausführungsbedingungen berücksichtigt werden. Bezüglich Häufigkeit, Dauer und Wegstrecke werden unterschiedliche Arten von Lastfällen unterschieden. Vorgänge, die weder lange Wegstrecken (>5m) noch Zeitdauern (>5s) umfassen, werden in Abhängigkeit der Häufigkeit je Schicht bewertet. Sind Wegstrecken von mehr als 5m zurückzulegen, erfolgt die Bewertung anhand der Gesamtwegstrecke pro Schicht. Lang andauernde Haltetätigkeiten mit einer Dauer vom mehr als 5s und ohne Wegstrecke, werden anhand der Gesamtdauer je Schicht bewertet.

Umsetzung zur automatischen Bewertung

Dem Modul liegen wiederum elf ergänzende Regeln zugrunde, die bei der Umsetzung berücksichtigt werden müssen. Für eine automatisierte Bewertung von EAWS-Modul 3 werden erneut Informationen bzgl. der Körperhaltung des Menschmodells benötigt, hierbei gelten dieselben Herausforderungen wie bei Modul 1 (vgl. Kapitel 4.2.1). Darüber hinaus sind weitere Daten notwendig, nämlich insbesondere die zu handhabenden Massen der Objekte, aber auch Ausführungsbedingungen.

Die Masse eines Objektes muss idealerweise bereits bei der Erstellung des digitalen Modells als ein Merkmal angelegt werden. In PDM-Systemen sind den digitalen Produktmodellen zumeist in Form von Attributen weitere Eigenschaften ergänzt. Diese können in Dialogen entnommen werden. In der Abbildung 46 ist der Eigenschaften-Dialog eines CAD-Modells im System CATIA dargestellt. Es handelt sich um das Modell eines Schraubwerkzeugs, die Masse ist mit 0,753kg als Attribut hinterlegt. Als Lastenhandhabung wäre die Manipulation dieses Objekts demnach nicht zu bewerten.

Spätestens für die Simulationsanwendung ist ein Wert für das Objektgewicht festzulegen, sofern eine korrekte Bewertung des EAWS-Moduls 3 erfolgen soll.

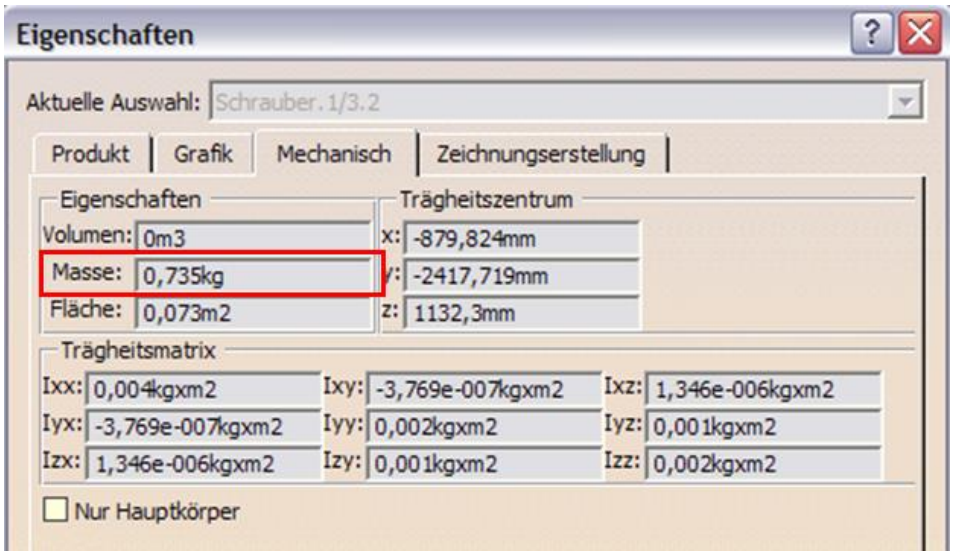


Abbildung 46 - Attribute eines digitalen Modells im System CATIA

Damit ist eine weitgehend automatische Beurteilung der Belastungen durch manuelle Lastenhandhabungen bereits möglich, alle weiteren Einflussgrößen (Wegstrecke, Dauer, Körperhaltung) können der Simulation automatisch entnommen werden. Eine Lastenhandhabung beginnt genau dann, wenn das Menschmodell mittels einer Verrichtung eine Verbindung mit einem Objekt aufnimmt und endet mit dem Lösen der Verbindung. Aus der Art und Dauer der Verrichtungen im Zeitraum während der aktiven Verbindung, ergibt sich die Art der Lastenhandhabung. Wird eine entsprechend lange Wegstrecke zurückgelegt, handelt es sich bspw. um einen Umsetzvorgang. Die Körperhaltung beim Aufnehmen und Absetzen der Last wie auch während der Lastenhandhabung wird kontinuierlich erfasst.

Da die Körperhaltungsklassen im Modul 3: Lastenhandhabung nicht denen des Moduls 1: Körperhaltungen entsprechen, ist eine passende Zuordnung der Körperhaltungsklassen zueinander notwendig. Dabei müssen zunächst die im Formblatt formulierten qualitativen Aussagen quantifiziert werden, wobei gemäß der verbalen Beschreibung im EAWS jeweils drei Ausprägungen gewählt wurden (Tabelle 6).

Ferner werden in Modul 3 lediglich vier Klassen von Haltungspunkten beschrieben, zwischen welchen jedoch interpoliert werden kann, was durch die unterbrochene Linie zwischen den Feldern im Bewertungsbogen verdeutlicht wird. Aus den möglichen Kombinationen der drei 3D-Anteile der Körperhaltung (Reichweite, Neigung und Drehung) mit jeweils drei Ausprägungen und den 16 2D-Körperhaltungsklassen ergeben sich 432 Kombinationsvarianten, für die jeweils ein Punktwert zwischen Eins und Acht definiert wurde. So wurde bspw. für aufrecht stehende Körperhaltungen (EAWS Zeile 1 oder 2) für jeweils geringe Drehung,

Neigung und Reichweite der Körperhaltungspunktwert 1 festgelegt, sofern zwei der drei 3D-Anteile der Körperhaltung eine mittlere Ausprägung haben und einer eine geringe, so werden 3 Punkte vorgegeben.

Tabelle 6 - Körperhaltungsklassen für das Modul Lastenhandhabung

Beschreibung	**Ausprägung**
Position der Last: definiert durch Reichweite der Arme zum Körper	
Last am Körper:	<60%
Last körpernah:	60% - <80%
Last körperfern:	80% - 100%
Rumpfneigen oder -drehen: Ermittlung analog Modul1	
kein Neigen/Drehen	<15°
geringes Neigen oder Drehen:	15° - <25°
Neigen oder Drehen:	25° - Maximum
Rumpfbeugen: Ermittlung analog Modul 1	
aufrecht:	<20°
geringes Beugen/Vorneigen:	20° - <60°
weites Beugen/Vorneigen:	>60°

In dieser Form ist eine eindeutige Zuordnung der qualitativen Beschreibung zu den exakten Körperhaltungen möglich.

Während Halte-, Trage- und Umsetzvorgänge automatisiert identifiziert werden können, ist dies beim Ziehen und Schieben nicht der Fall. Aus einem 3D-Modell kann die Art des Transportmittels nicht ohne weiteres entnommen werden. Als praktikable Lösung erweist sich eine manuelle Eingabe der Art der Lastenhandhabung (Abbildung 47).

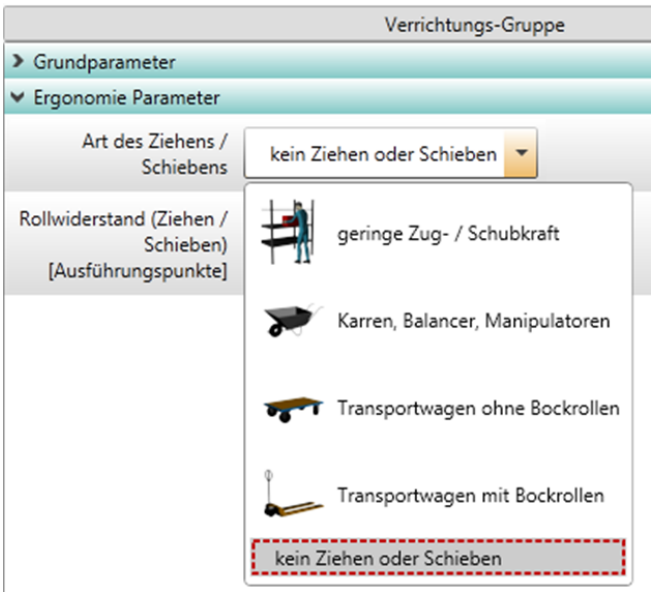


Abbildung 47 - ema-Eingabedialog für das Ziehen und Schieben

In Abbildung 47 ist der Eingabedialog im System ema (vgl. Kapitel 5.1) für eine Verrichtung abgebildet, die als Ziehen und Schieben bewertet werden soll. Dabei sind die Art des Ziehen und Schiebens, also das Transportmittel sowie die zu bewertende Ausprägung der Ausführungsbedingungen auszuwählen. Die Punkte für das Lastgewicht, die Wegstrecke bzw. Umsetzhäufigkeit und die Körperhaltung werden wiederum automatisiert berechnet.

4.2.4 EAWS Modul 0: Extrapunkte

Beschreibung des Moduls

EAWS-Modul 0 umfasst auf den Zeilen 0a bis 0e eine Vielzahl unterschiedlicher Belastungen, welche in den übrigen Modulen nicht berücksichtigt werden. Es handelt sich um Beeinträchtigungen durch Arbeit an sich bewegenden Objekten, eingeschränkte Zugänglichkeit, Rückschläge, Impulse oder Schwingungen, Gelenkstellungen sowie andere körperliche Belastungen. Die Punktevergabe erfolgt dabei anhand der Ausprägung sowie ggf. zeitabhängig.

Das Modul 0 ist weitgehend qualitativ formuliert. In der Anwendungspraxis obliegt es dem Analytiker, anhand von Erfahrungswerten oder betrieblicher Festlegungen, Punktwerte in geeigneter Höhe festzulegen.

Umsetzung zur automatischen Bewertung

Für eine automatisierte Umsetzung müssen die qualitativ formulierten Parameter quantifiziert werden.

Durch die Vielschichtigkeit der möglichen Belastungen, welche zur Vergabe von Extrapunkten führen, etwa in Form anderer körperlicher Belastungen (Modul 0e), ist eine automatisierte Vergabe nicht in Gänze zu realisieren. Eine einfache Lösung zur Gewährleistung einer ganzheitlichen Risikobetrachtung ist deren manuelle Eingabe

(Abbildung 48, Dialog-Fenster der Simulationssoftware ema, vgl. Kapitel 5.1). In Form eines Eingabe-Dialogs können die entscheidenden Ausprägungen der Belastungen manuell durch den Anwender eingegeben werden. Dabei sind in Anlehnung an das EAWS-Regelwerk Quantifizierungen vorgenommen worden. Die tatsächliche Berechnung der Punkte erfolgt automatisch anhand der Eingaben des Anwenders.

Abbildung 48 - ema-Eingabedialog für Extrapunkte

Alternativ können einige Belastungen, welche zur Vergabe von Extrapunkten führen, auch automatisiert identifiziert werden. Kritische Gelenkstellungen (Modul 0d) können analog der Körperhaltungsbewertung dem Menschmodell entnommen und automatisch bewertet werden. Schwingungen, Impulse, Rückschlagkräfte (Modul 0c) lassen sich, vergleichbar mit Aktionskräften, ausgewählten Verrichtungen zuordnen, so dass nur eine Eingabe der Intensität notwendig ist bzw. lässt sich diese auch parametrisch ermitteln.
Sofern neben Elementarverrichtungen auch Komplexverrichtungen für die Bewegungssynthese aufbereitet werden, ist künftig auch eine automatische Berücksichtigung der Zugänglichkeit (Modul 0b) möglich.

4.2.5 EAWS Modul 4: Belastung der oberen Extremitäten

Bei Modul 4 handelt es sich faktisch um ein separates Bewertungsverfahren innerhalb von EAWS. Es werden Belastungen der oberen Extremitäten durch hochrepetitive Tätigkeiten bewertet. Dabei finden Belastungen, welche bereits in den Modulen 0-3 bewertet wurden, erneut Berücksichtigung. Aktionskräfte und manuell

zu handhabende Lasten werden auch unterhalb der in den Modulen 2 bzw. 3 geltenden Grenzwerte von 30-40N bzw. 3kg bewertet.
Neben den durch die Tätigkeit hervorgerufenen Belastungen wirkt sich auch die Arbeitszeitgestaltung in Form der Schichtdauer sowie Pausenhäufigkeit und -dauer aus.
Grundlage der Bewertung in Modul 4 sind die sog. realen Aktionen, d. h. isolierte Bewegungshandlungen der oberen Extremitäten. Diese lassen sich am einfachsten über die dem Ablauf zugrunde liegende MTM-Analyse ermitteln.
Die für die Bewertung von Modul 4 notwendigen Informationen entsprechen überwiegend denen, die für die übrigen Module bereits benötigt werden, so dass eine weitgehend automatische Bewertung möglich ist. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst jedoch ausschließlich eine Ganzkörperbewertung realisiert, da bislang noch keine vollständige, validierte Ausgabe einer MTM-Analyse für die Simulationen implementiert wurde.

4.2.6 Zusammenfassung

EAWS ist ein aus mehreren Modulen aufgebautes Kombinationsverfahren zur Bewertung physischer Belastungen. Die Bewertungskriterien sind vielmals qualitativ formuliert. Jedem Modul liegt ein komplexes Regelwerk zugrunde. Die EAWS-Bewertung erfordert zum Teil umfassende Rechenschritte.
In Kapitel 2.6 wurde in Hypothese 4 formuliert, dass eine vorliegende vollständige Ablaufbeschreibung eine weitgehend automatische Ergonomiebewertung mehrerer Belastungsfaktoren ermöglicht. Der Hypothese folgend wurde unter Berücksichtigung des in Kapitel 3.1 vorgestellten Verrichtungskonzeptes für jedes Modul der EAWS-Ganzkörperbewertung ein Konzept zur semiautomatischen Bewertung für digitale Mensch-Simulationen entwickelt. Semiautomatisch bedeutet, dass der Großteil der für die Beurteilung notwendigen Daten, bspw. Körperhaltungen oder Zeitdauern, automatisch der Simulation entnommen werden kann und der Anwender nur wenige manuelle Eingaben ergänzen muss. Insbesondere die aufwendige Berechnung der Punkte erfolgt allein durch die Software. Eine rein automatische Erfassung aller Einflussgrößen ist anhand der bloßen Bewegungssimulation nicht möglich. Durch das im Projekt eMAN entwickelte Verrichtungskonzept können jedoch fehlende Informationen abgeleitet werden. Lediglich eine geringe Anzahl manueller Eingaben, etwa von Kraftwerten oder Lastgewichten ist notwendig, wobei eine Vorbelegung dieser Werte sinnvoll ist. Außerdem ist es denkbar, diese Parameter den jeweiligen Interaktionsobjekten direkt zuzuweisen, so dass eine mehrmalige Eingabe nicht notwendig ist.

5 Umsetzung der Ergebnisse und Praxisevaluation

Das experimentell erlangte Wissen zur humanmotorischen Ausführung menschlicher Bewegungen wie auch die Konzeption der semiautomatischen EAWS-Bewertung flossen in die Entwicklung einer 3D-Simulationssoftware zur Planung, Gestaltung und ergonomischen Analyse der menschlichen Arbeit ein, den Editor menschlicher Arbeit (ema). Die realisierte Software wurde hinsichtlich der funktionalen Umsetzung sowie bezüglich ihrer Praxistauglichkeit überprüft. Inhalte dieses Kapitels wurden zum Teil bereits in Form von Tagungsbeiträgen publiziert (Jendrusch, 2012; Schönherr, Fritzsche, & Schmickartz, 2013).

5.1 Der Editor menschlicher Arbeit

5.1.1 Begriffsbestimmung

Bereits seit dem Jahr 2005 wird durch die imk automotive GmbH in Chemnitz eine Software zur Planung und Visualisierung manueller Tätigkeiten entwickelt, welche im Jahr 2006 zunächst prototypisch umgesetzt wurde (Bauer S., 2006). Die Software wurde seitdem stetig weiterentwickelt und die Ergebnisse der vorgestellten Forschungsarbeiten flossen entsprechend ein. Die Bezeichnung Editor menschlicher Arbeit (ema) steht dabei einerseits für die Softwarelösung insgesamt, andererseits aber auch für das zugrunde liegende, eigene Menschmodell.

Die Software ema ist ein Werkzeug, welches die Prozessplanung manueller Tätigkeiten vereinfachen soll. Neben der Visualisierung der menschlichen Bewegungen entstehen weitgehend automatisch Aussagen über das Zeitverhalten und die Ergonomie, Ergebnisse, die bislang nur in sehr aufwendigen Planungsschritten erzeugbar gewesen sind.
Kern des ema sind die Algorithmen zur Bewegungssynthese, so dass zunächst eine Adaption an eine bestehende 3D-Planungssoftware, DELMIA V5, erfolgte. Anschließend wurde eine völlig eigenständige Version mit eigener 3D-Graphik-Umgebung entwickelt.

Das Menschmodell ema ist aus 58 Segmenten aufgebaut und verfügt über 90 Freiheitsgrade. Bei der Adaption an bestehende Software wird ggf. das bereits verfügbare Menschmodell verwendet.

5.1.2 Funktionsprinzip

Die Grundidee des ema ist das visuelle Planen in einer virtuellen 3D-Umgebung, während konventionelle Planung hingegen überwiegend alphanumerisch ausgeführt wird und erst anschließend erfolgt ggf. eine Visualisierung der Planungsergebnisse zum Zweck der Plausibilisierung.

Die Initiierung der Bewegungen des Menschmodells basiert dabei auf Verrichtungen (vgl. Kapitel 3.1). Damit erfolgt die Modellierung in eben der Detailliertheit, die ein Praktiker zur Planung manueller Tätigkeiten verwendet. Die Verrichtungen sind mit entsprechenden Parametern belegt, so dass die für den konkreten Anwendungsfall notwendige Ausprägung realisiert werden kann. Nach Möglichkeit werden die Parameter automatisch der Szene und dem Ablauf entnommen (z. B. Greifart am Objekt), andere müssen manuell eingegeben werden (z. B. Applikationspunkt für ein Werkzeug).
Der Umfang der Verrichtungen wird ständig weiterentwickelt und umfasst derzeit 27 Verrichtungen aus den in Abbildung 49 dargestellten Kategorien.

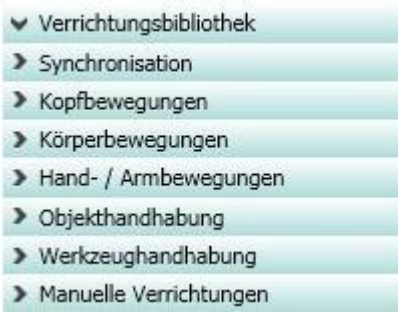


Abbildung 49 - Verrichtungsbibliothek des ema

So wie ein realer Facharbeiter anhand des vorgegebenen Arbeitsplanes weiß, wie er die Arbeit auszuführen hat, werden auch die Bewegungen des Menschmodells ema automatisch erzeugt, nämlich in eben der Motorik eines Facharbeiters. Dies wird durch die im Rahmen der Bewegungsstudien gewonnen Erkenntnisse ermöglicht, die in Algorithmen zur Bewegungssynthese umgesetzt wurden (vgl. Kapitel 3.6).
ema verarbeitet alle eingegebenen Werte der Verrichtungen und Parameter und erzeugt daraus eine zeitrichtige Bewegungsbeschreibung des Menschmodells.
Die Software ist modular aufgebaut, der Anwender arbeitet in zwei getrennten Fenstern. Der Aufbau der Szene, die Eingabe entsprechender Parameter sowie die Visualisierung der Simulation erfolgen im Szeneneditor der 3D-Umgebung (Abbildung 50).

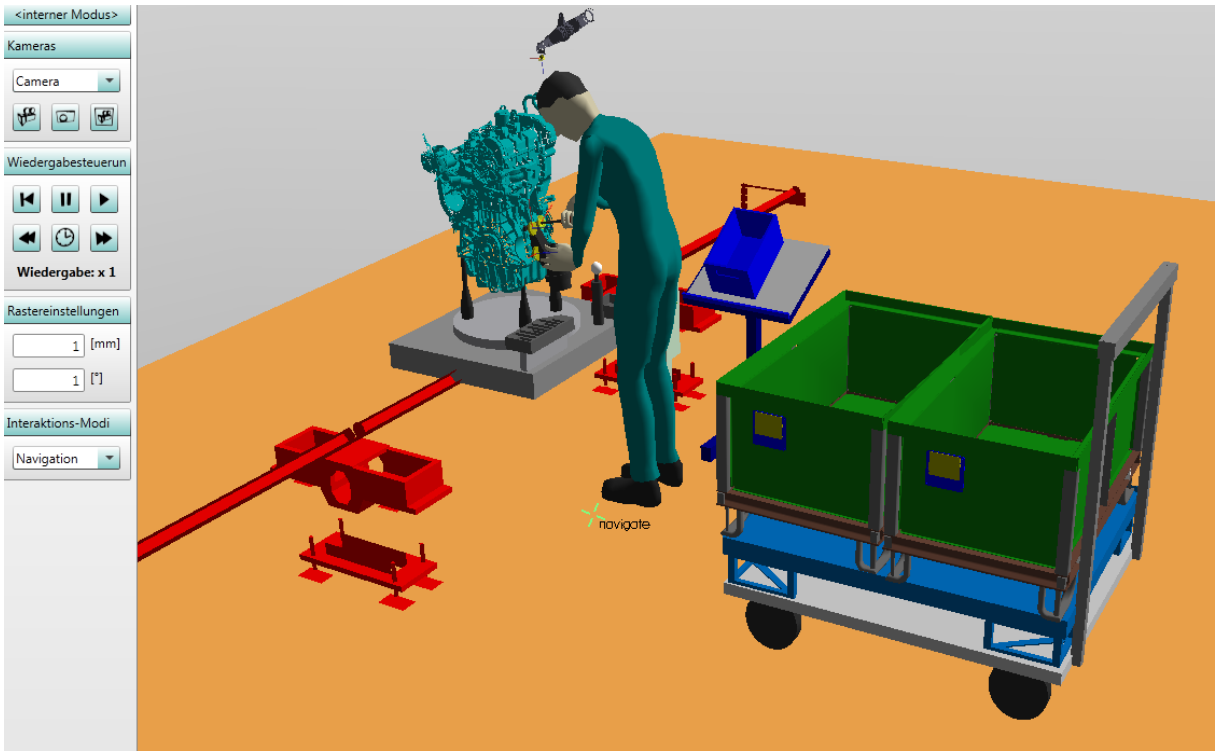


Abbildung 50 - 3D-Szene einer digitalen Menschsimulation

Dies kann die Simulationsumgebung einer anderen Software, z. B. DELMIA, sein, aber auch die eigene Graphikausgabe des ema.
Die Verwaltung des Verhaltens, der Interaktionsobjekte und die Ausgabe der Simulationsauswertung hinsichtlich Zeit oder Ergonomie erfolgen in einem zweiten Fenster, der ema-Benutzeroberfläche (Abbildung 51).

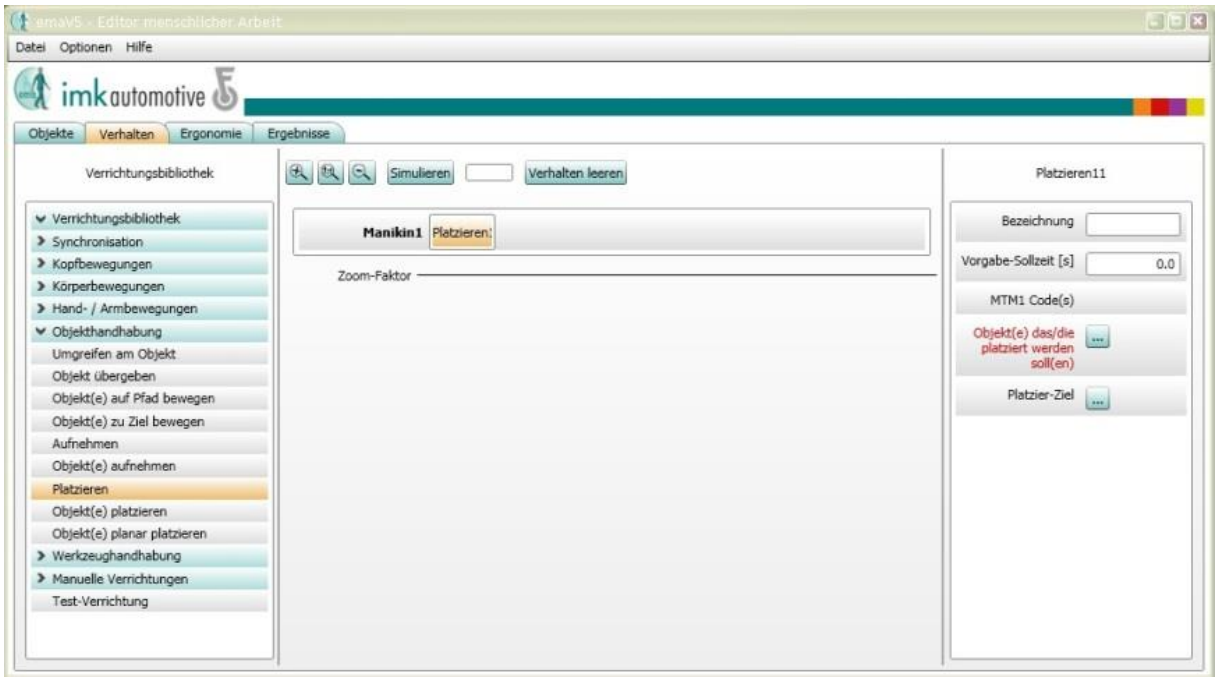


Abbildung 51 - ema-Benutzeroberfläche

Der Workflow zur Planung mit ema umfasst die folgenden Arbeitsschritte:

- Aufbau der Simulationsumgebung: Laden aller notwendigen Produkt- und Ressourcendaten und Anordnung im Ausgangszustand;
- Eingabe der Prozessinformationen: Definition der Verrichtungen, welche im Zeitverlauf nacheinander ausgeführt werden sollen;
- Simulation: Berechnung der Bewegungen des Menschmodells durch die Software;
- Visualisierung: Ansehen der generierten Simulation durch den Anwender;
- Auswertung der Simulation: Berechnung der Zeitanalyse oder EAWS-Bewertung;
- bedarfsweise Modifikation und Optimierung der geplanten Variante.

Zum Funktionsumfang gehören neben der Bewegungsgenerierung und Auswertung auch sog. High-Level-Funktionalitäten wie eine vereinfachte Kollisionsvermeidung anhand der Object-Bounding-Volumes, zeitliche Synchronisation mehrerer Menschmodelle oder automatische Greifpunktermittlung (vgl. Kapitel 3.6.1).

5.1.3 Zusammenfassung

Der Editor menschlicher Arbeit (ema) ist eine Software zur humanmotorisch validen Planung manueller Tätigkeiten. Auf Basis einer Bibliothek parametrischer Verrichtungen können Bewegungen graphisch modelliert und hinsichtlich Vorgabezeit und Ergonomie bewertet werden. Damit ergänzt ema die Planungsmethodik der digitalen Fabrik um Aspekte der menschlichen Arbeit in der Produktion und ermöglicht eine ganzheitliche virtuelle Absicherung.
Der Begriff ema steht sowohl für die Software als auch für das implementierte digitale Menschmodell. ema wurde modular entwickelt, was eine Anwendung als eigenständige Software wie auch eine Anbindung an bestehende Planungssysteme ermöglicht.

5.2 Studie zur Praxisevaluation

Das entwickelte Softwarewerkzeug ema dient der Plausibilisierung von Planungsalternativen und soll dazu beitragen, Belastungsschwerpunkte bzw. potentielle Gesundheitsrisiken rechtzeitig zu erkennen um entsprechende Maßnahmen zur Prävention einzuleiten. Dafür muss jedoch sichergestellt werden, dass das modellierte System belastbare Prognosen ermöglicht, d. h. die Software muss validiert werden. Darüber hinaus sollen durch eine zielgerichtete Bewertung auch Aussagen zum Nutzen der Software getroffen werden, d. h. die Software soll evaluiert werden. Da bereits eine marktreife Version des Systems vorliegt, eignet sich hierfür eine Feldstudie, wobei die Evaluation sowohl gegen die Forschungslücke (vgl. Fragestellungen, Kapitel 1.2) als auch gegen die Realwelt erfolgt, indem reale

Anwendungsfälle genutzt werden (Riege, Saat, & Bucher, 2009). Die Evaluation erfolgt zu Kontrollzwecken. Es sollen die Erfolgskriterien Effektivität, Effizienz und Validität der entwickelten Software überprüft werden, wobei die Objektivität der Bewertung sichergestellt werden muss (Kromrey, 2001; 2005).

5.2.1 Untersuchungsgegenstand

Allgemein gilt, dass eine Methode oder ein Werkzeug als valide betrachtet werden kann, wenn es genau das misst, was es zu messen vorgibt (Bortz & Döring, 2006). Gemäß DIN EN ISO 9000 (2005) wird Validierung wie folgt definiert:

„Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass die Anforderung für einen spezifisch beabsichtigten Gebrauch oder eine spezifische beabsichtigte Anwendung erfüllt worden sind.“

Es ist folglich zu untersuchen, ob die Simulation valide Vorhersagen zur menschlichen Arbeitsweise und den damit verbundenen ergonomischen Belastungen am geplanten Arbeitsplatz ermöglicht. Dafür ist zunächst zu überprüfen, ob die Ergonomiebewertungsmethode EAWS formal korrekt implementiert wurde. Sofern dies sichergestellt ist, kann die Evaluation der Praxistauglichkeit anhand realistischer Planungsszenarien erfolgen. Hier soll überprüft werden, ob die generierten Bewegungen tatsächlich korrekt sind, d. h. ob das Bewegungsverhalten einem Beobachter als hinreichend wirklichkeitsgetreu erscheint und außerdem biomechanischen Gesetzmäßigkeiten genügt. Darüber hinaus soll die Ergonomiebewertung eines Experten zu einem vergleichbaren Ergebnis kommen wie die semiautomatisch durch die Software ermittelte. Dabei werden auch die Genauigkeit sowie der zeitliche Aufwand berücksichtigt.

5.2.2 Vorbetrachtungen

Die implementierte EAWS-Bewertung umfasst insgesamt vier Module (vgl. Kapitel 4.2), denen jeweils eigene Datentabellen sowie Regeln zugrunde liegen. Zunächst wurde daher anhand von fiktiven Szenarien die Richtigkeit und Vollständigkeit der EAWS-Umsetzung überprüft. Die Testfälle wurden so konstruiert, dass sämtliche Regeln und Sonderfälle abgeprüft werden. Dabei sind an die Szenen keine weiteren Anforderungen hinsichtlich der Praxisnähe gestellt. Es genügen kurze Szenen, welche mit wenigen Objekten modelliert werden, um systematisch jede Regel zu überprüfen. Insgesamt wurden 15 Testszenarien mit einer Ablaufdauer von ca. 6,5 min erstellt. Diese umfassten 134 Verrichtungen, was einer mittleren Dauer von 3s pro Verrichtung entspricht.
Während des Testens ließen sich ca. 20 Regelabweichungen und kleinere Software-Fehler identifizieren. In Form eines iterativen Vorgehens wurden diese parallel zu

weiteren Untersuchungen durch die Software-Entwicklung der imk automotive GmbH behoben, so dass nach Abschluss dieser Vorbetrachtungen die formale Korrektheit der EAWS-Implementierung bestätigt werden konnte.

5.2.3 Stichprobe

Es wurden zwölf reale Planungssimulationen ausgewählt. Diese umfassen Montageoperationen am Fahrzeug wie auch Vormontagetätigkeiten an Komponenten. Die Szenarien wurden so ausgesucht, dass neben unterschiedlichen Körperhaltungen auch Belastungen durch Aktionskräfte und manuelle Lastenhandhabung vorkamen. Die mittlere Dauer einer Simulation betrug etwa 90 Sekunden. Da die Szenen verschiedenen Bereichen entstammen, wurden sie durch unterschiedliche Bearbeiter erstellt. Wie in Kapitel 5.1 erläutert, wird die Software ema sowohl eigenständig als auch als Plug-In für bestehende Systeme angeboten. Innerhalb der Stichprobe erfolgte in vier Fällen die Modellierung mit dem Menschmodell ema, in den übrigen acht mit dem Menschmodell Human Builder. Zur Bewegungssynthese wurde in allen Szenarien die ema-Software verwendet.

5.2.4 Untersuchungsdesign

Alle zwölf Simulationen wurden von drei Experten mit der notwendigen Qualifizierung und Erfahrung auf dem Gebiet der Ergonomiebewertung mit EAWS beurteilt. Die Szenarien standen den Beobachtern dabei als Video zur Verfügung, so dass diese beliebig oft betrachtet werden konnten. Für die Überprüfung der Qualität der simulierten Bewegungen wurde ein Fragebogen erstellt (Anlage 5, Abbildung 52). Mit Hilfe von fünf kurzen und prägnanten Fragen wurde untersucht, inwieweit die Bewegungen des digitalen Menschmodells humanmotorisch richtig wirken. Dies betrifft die Biomechanik der Körperhaltungen, die Flüssigkeit der Bewegungsmuster und die gewählte Arbeitsmethode sowie eine generelle Einschätzung der Eignung der Simulationen zur Plausibilisierung geplanter Arbeitsabläufe und zur präventiven Ergonomiebewertung.

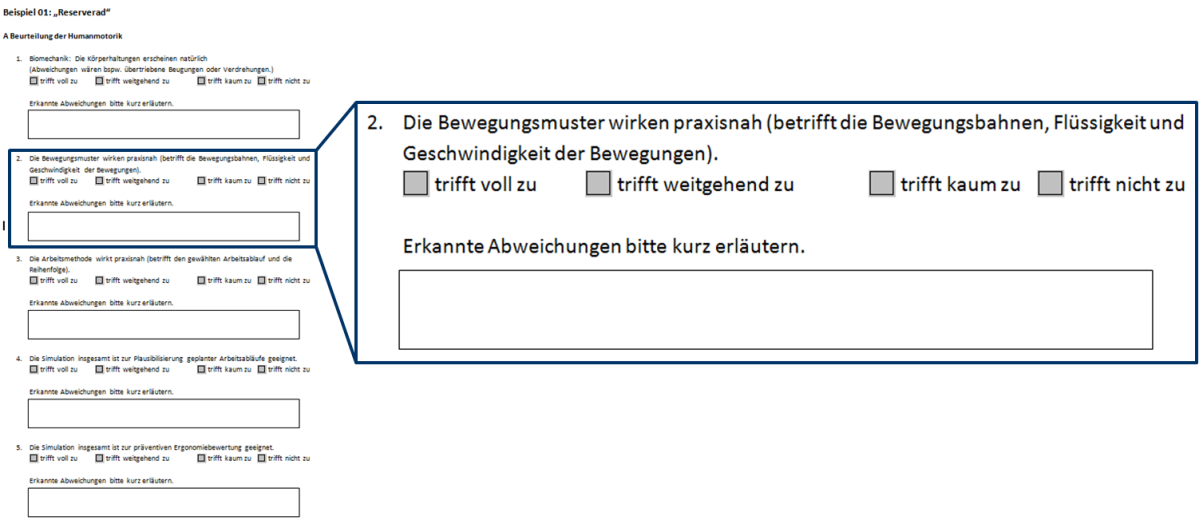

Beispiel 01: „Reserverad"
A Beurteilung der Humanmotorik
1. Biomechanik: Die Körperhaltungen erscheinen natürlich
(Abweichungen wären bspw. übertriebene Beugungen oder Verdrehungen.)
trifft voll zu
trifft weitgehend zu
trifft kaum zu
trifft nicht zu
Erkannte Abweichungen bitte kurz erläutern.
2. Die Bewegungsmuster wirken praxisnah (betrifft die Bewegungsbahnen, Flüssigkeit und Geschwindigkeit der Bewegungen).
trifft voll zu
trifft weitgehend zu
trifft kaum zu
trifft nicht zu
Erkannte Abweichungen bitte kurz erläutern.
3. Die Arbeitsmethode wirkt praxisnah (betrifft den gewählten Arbeitsablauf und die Reihenfolge).
4. Die Simulation insgesamt ist zur Plausibilisierung geplanter Arbeitsabläufe geeignet.
5. Die Simulation insgesamt ist zur präventiven Ergonomiebewertung geeignet.

Abbildung 52 - Fragebogen zur Evaluationsstudie (Auszug)

Zu jeder Frage wurden die vier ordinal skalierten Antwortmöglichkeiten „trifft voll zu" (4), „trifft weitgehend zu" (3), „trifft kaum zu" (2) und „trifft nicht zu" (1) angeboten. Diese Vierteilung wurde gewählt, um Mittelungseffekte zu vermeiden. Ferner sind die Beobachter aufgefordert, etwaige Auffälligkeiten kurz zu umreisen.

Für die quantitative Untersuchung der Vorhersagegüte der ergonomischen Belastungen führten die Beobachter eine Stift-Papier-Bewertung mit EAWS durch. Die Software liefert gleichfalls eine EAWS-Bewertung, die als Bericht in tabellarischer Form exportiert werden kann. Somit liegen die Gesamtpunktwerte wie auch detaillierte Einzelwerte zur Auswertung vor. In den Simulationen berücksichtigte Eingangsgrößen, bspw. Kräfte oder Bauteilgewichte, waren den Beobachtern bekannt. Jeder Beobachter arbeitete selbständig und ohne sich mit den anderen auszutauschen. Die Ergebnisse der automatisiert gewonnenen EAWS-Bewertung kannten die Beobachter im Vorfeld nicht.

5.2.5 Ergebnisse

Expertenbeurteilung der Simulationsqualität

Anhand der Häufigkeitsverteilung der Antworten auf die Fragen zur Humanmotorik konnten Rückschlüsse darüber gezogen werden, ob die Simulationen eine vergleichbare Qualität haben oder sich in einzelnen Merkmalen unterscheiden. Ferner konnten etwaige Ursachen für eine ggf. schlechte Übereinstimmung zwischen den manuell und automatisiert erstellten EAWS-Bewertungen identifiziert werden.

Tabelle 7 zeigt die Antworten der drei Beobachter zur Frage 1: „Biomechanik: Die Körperhaltungen erscheinen natürlich." Kein Beobachter hat die Antwortmöglichkeit „trifft nicht zu" gewählt, in mehr als 80% der Fälle wurde „trifft voll zu" oder „trifft weitgehend zu" als Antwort gegeben.

Tabelle 7 - Einschätzung der Beobachter zur Natürlichkeit der simulierten Körperhaltungen

Szenario	Beobachter 1	Beobachter 2	Beobachter 3
1	3	3	3
2	3	4	3
3	2	3	4
4	3	4	3
5	2	4	4
6	3	3	3
7	3	3	4
8	2	4	2
9	4	3	3
10	2	3	3
11	4	4	2
12	2	3	4
Häufigkeitsverteilung			
trifft voll zu (4)		11 (31%)	
trifft weitgehend zu (3)		18 (50%)	
trifft kaum zu (2)		7 (19%)	
trifft nicht zu (1)		0 (0%)	

Einschränkungen in Bezug zur Biomechanik wurden insbesondere bei Bewegungen im Innenraum eines Fahrzeugs oder in Form von kurzen Sprüngen in der Bewegung erkannt. Die simulierte Arbeitsmethode (Frage 3, $\tilde{x}$=3,7) wurde als überwiegend praxisnah eingeschätzt. Insgesamt beurteilten die Experten die Simulationen sowohl für die Plausibilisierung geplanter Abläufe (Frage 4, $\tilde{x}$=3,3) als auch zur präventiven Ergonomiebewertung (Frage 5, $\tilde{x}$=3,2) als weitgehend geeignet.

Beobachterübereinstimmung der Experten

Als Maß für die Übereinstimmung hinsichtlich der Risikokategorien grün, gelb, rot wurde Cohens Kappa, (Bortz & Döring, 2006) berechnet. Da Cohens Kappa ausschließlich für jeweils zwei Beobachter ermittelt werden kann, wurde der Kennwert für die drei möglichen Paare berechnet und anschließend der Median als Schätzwert der mittleren Übereinstimmung gewählt. Mit κ=0,351 wurde eine mäßige Übereinstimmung ermittelt (κ>0,70 gilt als gut). In 50%-67% der Fälle stimmten die Kategorien überein, extreme Unterschiede (grün-rot) traten nicht auf.

Die Übereinstimmung der intervallskalierten Risikopunktwerte wurde mit Hilfe der Intraklassen-Korrelation, r_k, (Bortz & Döring, 2006) überprüft. Der ermittelte Wert von r_k=0,869 zeigt eine gute Übereinstimmung an.

Vergleich der Ergonomiebewertungen Experte vs. System

Abbildung 53 zeigt die Gegenüberstellung der EAWS-Gesamtpunkte der zwölf Szenarien für die drei Bobachter und ema. Vereinzelt zeigen sich deutliche

Abweichungen zwischen den Beobachtern und ema, bspw. für Szenario 6. Hier liegt ema deutlich über der Bewertung der Experten. In anderen Beispielen, etwa Szenario 4, zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung.

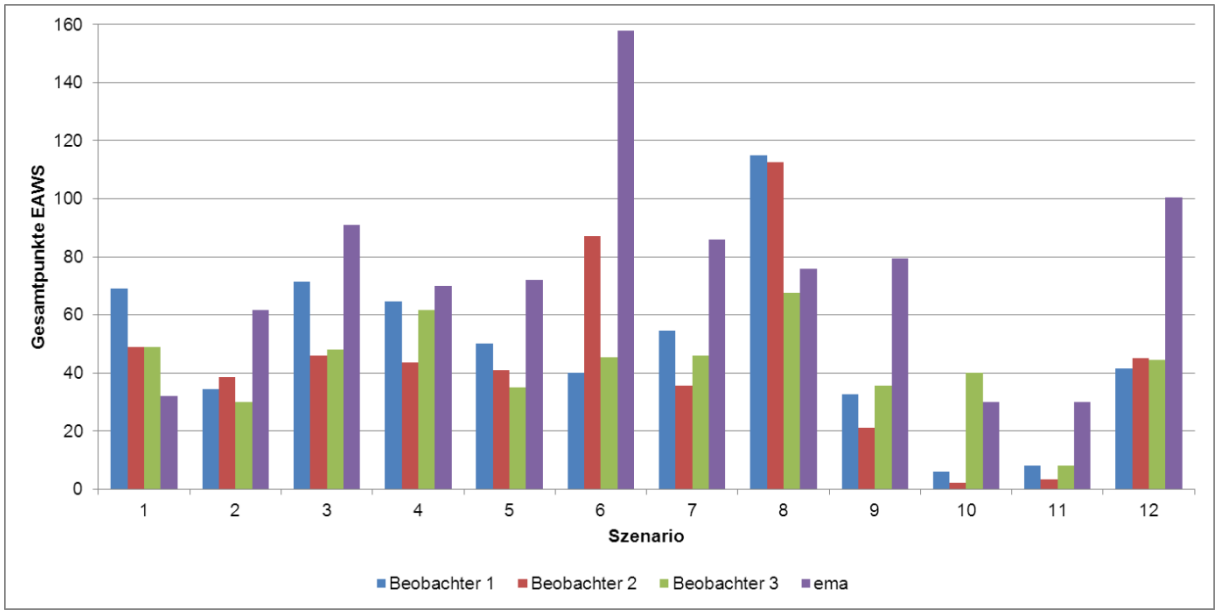


Abbildung 53 - Gegenüberstellung der EAWS-Bewertungen der drei Beobachter und von ema

Die Bewertungen der drei Beobachter wurden gemittelt und mit den Punktwerten der automatischen Bewertung verglichen. Aufgrund der vergleichsweise kleinen Stichprobe wurde als Rangkorrelationskoeffizient Kendalls Tau, (Bortz & Döring, 2006) berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8 - Rangkorrelationen der EAWS Risikobewertung zwischen den Beobachtern und ema

Gesamtpunkte	0,381*
Körperhaltungen gesamt	0,443*
Körperhaltungen symmetrisch	0,515**
Körperhaltungen asymmetrisch	0,264
Aktionskräfte	0,874***
Manuelle Lastenhandhabung	0,789***

* signifikant mit p<0,05
** sehr signifikant mit p<0,01
*** hoch signifikant mit p<0,001

Für die Gesamtpunkte wurde mit τ=0,381 (signifikant mit p<0,05) ein mittlerer Zusammenhang ermittelt. Bei den Körperhaltungen ergab sich ein etwas stärkerer Zusammenhang mit τ=0,443 (signifikant mit p<0,05). Hier zeigte sich, dass ema tendenziell zu einer höheren Bewertung führt, wobei insbesondere deutlich häufiger Punktwerte für asymmetrische Körperhaltungen (Rumpfdrehung, -neigung,

Reichweite) vergeben wurden. So korrelieren die symmetrischen Körperhaltungen mit τ=0,515 (sehr signifikant mit p<0,01) deutlich, während sich bei den asymmetrischen Körperhaltungen mit τ=0,264 (p>0,05) kein signifikanter Zusammenhang ergibt. Lasten und Aktionskräfte wurden jeweils in 4 von 12 Simulationen bewertet, wobei in beiden Fällen starke Zusammenhänge ermittelt werden konnten. Die Punkte korrelieren für Aktionskräfte mit τ=0,874 (hoch signifikant mit p<0,001), für Lasten mit τ=0,789 (hoch signifikant mit p<0,001).
Die erkannte Höherbewertung von Körperhaltungen seitens ema im Vergleich zu den Experten lässt sich darauf zurückführen, dass ema mit exakten Gelenkwinkeln rechnet und somit geringfügige Verdrehungen des Rumpfes sicher erkennt, wohingegen ein Beobachter hier Probleme hat, insbesondere wenn nur ein Video mit genau einer Perspektive zur Verfügung steht. Abbildung 54 zeigt eine geringfügige Rumpfdrehung des ema-Menschmodells in einem der Beispielszenarios. Keiner der drei Beobachter hat hier Punkte für asymmetrische Körperhaltungen vergeben, in ema jedoch wurden etwa 13 Punkte ermittelt.

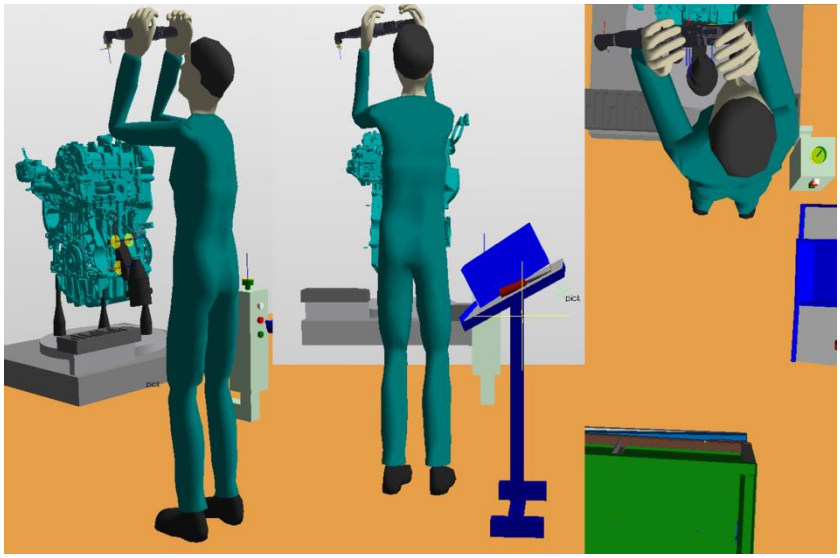


Abbildung 54 - Geringfügige Rumpfdrehung in einem Beispielszenario

Hier zeigt sich ggf. auch Verbesserungspotential der EAWS-Methode, da zwischen den qualitativen Formulierungen wie bspw. bei der Rumpfverdrehung „mittel“ und den quantitativen Winkelangaben, im genannten Bsp. „15°“, offenbar eine Diskrepanz besteht. Eine solch geringfügige Verdrehung ist kaum erkennbar (vgl. Abbildung 55), ob tatsächlich eine physische Belastung daraus resultiert ist fraglich. Dennoch erweist sich die Software-basierte Bewertung hier als genauer als die manuelle und führt im Rahmen des EAWS-Regelwerks zu exakteren Ergebnissen.
Gegebenenfalls ist der Bewegungsgenerator des ema dahin gehend zu überarbeiten, dass kleine Korrekturbewegungen der Beine unnötigen asymmetrischen Rumpfstellungen (z. B. seitliche Verdrehung) vorbeugen, sofern dies die Natürlichkeit der Bewegungen nicht verfälscht.

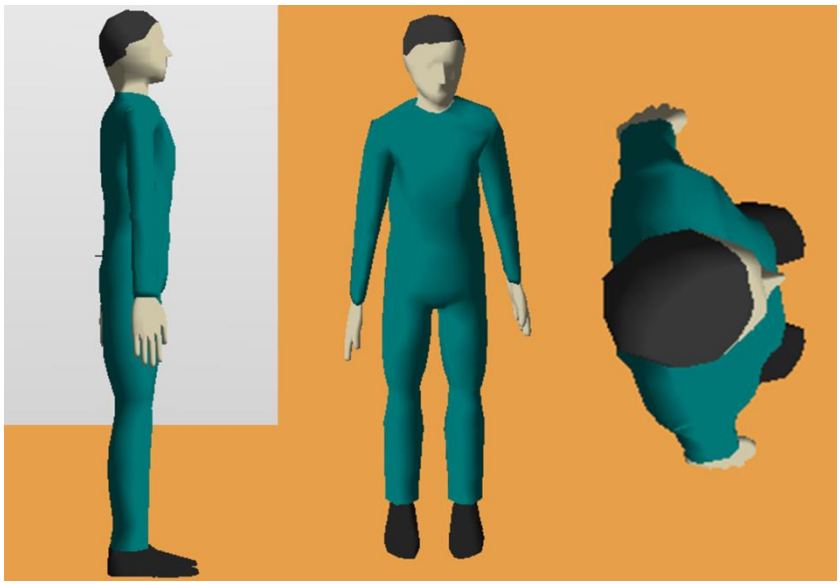


Abbildung 55 - Menschmodell ema: mittlere Rumpfdrehung von 15° bei aufrechter Körperhaltung

Die starke Überbewertung in Szenario 6 lässt sich damit erklären, dass hier angegebene Kraftwerte durch alle Beobachter als Ganzkörperkraft interpretiert, in ema jedoch als Fingerkraft modelliert und demzufolge auch bewertet wurden.

5.2.6 Zusammenfassung

In der Studie zur Praxisevaluation wurden drei Kriterien untersucht. Zunächst wurde die Validität der Umsetzung des EAWS-Regelwerks in ema überprüft. Darüber hinaus wurde die Effektivität wie auch die Effizienz in der praktischen Anwendbarkeit untersucht. Die Ergebnisse der Studie können in theoretischer wie auch praktischer Hinsicht einen Beitrag leisten. Die Überprüfung der EAWS-Umsetzung bestätigte, dass die bislang implementierten Module 0-3 formal korrekte Ergebnisse liefern. Die qualitative Einschätzung der Experten zu den Simulationen bestätigte die Effektivität von ema als Werkzeug zur Planung und Ergonomieabsicherung. Entwicklungsschwerpunkte für künftige Arbeiten, bspw. im Hinblick auf die Flüssigkeit der Bewegungen, konnten abgeleitet werden.

Anhand des Vergleichs von manuellen und automatisiert gewonnenen Ergonomiebewertungen konnte die Vorhersagegüte beurteilt werden. Dabei wurde ein mittlerer, signifikanter Zusammenhang ermittelt. Ursachen für noch bestehende Unterschiede, etwa die Interpretation von Ganzkörperkräften als Fingerkräfte konnten identifiziert werden. Die sehr exakte Bewertung asymmetrischer Körperhaltungen zeigte die Effizienz der semiautomatischen Ergonomiebewertung im Vergleich zur manuellen Durchführung durch einen Anwender.

Insgesamt bestätigte die Studie die Praxistauglichkeit des ema zur Plausibilisierung von Planungsalternativen sowie für die präventive Ergonomiebewertung, was die betriebliche Anwendung des ema bestärkt. Auf Basis der Erkenntnisse von weiteren

praktischen Einsätzen kann schließlich die Simulationsqualität und Vorhersagegenauigkeit des ema kontinuierlich verbessert werden.

5.3 Praxiseinsatz digitaler Mensch-Simulationen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde erläutert, wie die in der vorliegenden Arbeit diskutierten Konzepte einerseits die Bewegungsgenerierung für digitale Menschmodelle (vgl. Kapitel 3) und andererseits die Ergonomiebewertung (vgl. Kapitel 4) erleichtern und beschleunigen können. Anhand der in den Phasen des PEP vorhandenen Daten und Informationen sowie der ergonomiebezogenen Anforderungen wurde anschließend untersucht, wie etablierte Planungsprozesse mit digitalen Menschmodellen sinnvoll unterstützt werden können und welche Herausforderungen noch bestehen. Im Rahmen realer Planungsprojekte wurde der Einsatz digitaler Menschsimulation hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten überprüft.

5.3.1 Anforderungsermittlung

Sollen digitale Menschmodelle eine umfassende und durchgängige Ergonomieabsicherung ermöglichen, müssen entsprechende Voraussetzungen hinsichtlich Qualifizierung der Nutzer, Hard- und Software sowie Datenverfügbarkeit geschaffen werden.

Die Einbettung von Ergonomiemeilensteinen in den PEP wurde in Kapitel 2.5.3 diskutiert. Dabei können vier wesentliche Schwerpunkte identifiziert werden, die Absicherung der manuellen Verbaubarkeit von Produktvarianten, die ergonomische Produktgestaltung/-optimierung, die Sicherstellung der Arbeitsplatzergonomie und die Qualifikation der Mitarbeiter zur ergonomischen Arbeitsweise. Demzufolge sind auch unterschiedliche Personengruppen mit abweichenden Qualifizierungen hinsichtlich Ergonomie am Gesamtprozess beteiligt.

Die Software-Implementierungen der Digitalen Fabrik sind momentan vorwiegend auf die Produktionsplanung ausgerichtet. Ein Einsatz über den gesamten Produktionslebenszyklus könnte Optimierungs- und Rationalisierungspotentiale erschließen. Dabei müssten Konstruktion, Planung und Betrieb ihre eingesetzte Software jedoch übergreifend abstimmen und datentechnisch vernetzen (Schlögl, 2007).

Im Laufe des Produkt-Entstehungs-Prozesses werden aktuell auch für Ergonomiebetrachtungen verschiedene, sowohl alphanumerische als auch graphische Softwaresysteme eingesetzt. Dies induziert Reibungsverluste aufgrund unterschiedlicher Daten- und Wissensstände der Beteiligten und wirkt sich negativ auf den Planungsprozess aus. Die zu lösenden Aufgaben werden dabei überwiegend sequentiell durch die Bereiche bearbeitet, wodurch erhöhter Abstimmungsaufwand notwendig wird. Bei der Auswahl bzw. Entwicklung einer Software zur Menschsimulation ist demzufolge darauf zu achten, dass keine Insellösung entsteht,

sondern eine Integration in die bestehende Programmlandschaft realisiert wird. Dies lässt sich einerseits durch eine vollständige Integration der Menschmodelle in die etablierte Planungssoftware erreichen oder andererseits durch funktionierende Schnittstellen. Minimal notwendig für die Anwendung digitaler Absicherung mit einem Menschmodell sind dreidimensionale Produktdaten. Umgebungsgeometrien können insbesondere in frühen Phasen vernachlässigt werden, später genügen grobe Modelle. Dies verringert auch die Hardware-Anforderungen, da sich große Datenmengen, wie etwa sehr exakte 3D-Fabrik-Layouts, negativ auf die Leistungsfähigkeit der Hardware auswirken, was sich bspw. in sehr langen Ladezeiten oder gar Systemabstürzen äußert. Betriebsmittel wie auch Vorrichtungen und sonstige Interaktionsobjekte können Bibliotheken entnommen oder vereinfacht nachmodelliert werden.

5.3.2 Anwendungsfälle und Vorgehensweise

Während der Produktentwicklung liegen als Eingangsdaten virtuelle Modelle und Stücklisten vor, wobei mehrere Gestaltungsalternativen zur Auswahl stehen. Auf Basis eines Referenzprodukts sind ferner kritische Bauteile hinsichtlich der Ergonomie bekannt. Der Einsatz digitaler Menschmodelle dient hier vor allem der Sicherstellung grundlegender Anforderungen an Sicherheit und Gesundheit sowie der Beachtung ergonomischer Grundsätze. Es wird vorwiegend das Produkt betrachtet. In der Phase der Produktdefinition können Gestaltungsalternativen verglichen werden. Sofern eine Variante gewählt wurde, kann diese im Rahmen der Produktentwicklung detailliert und optimiert werden. Dabei werden die Sichtbarkeit und Zugänglichkeit von Bauräumen überprüft und unerwünschte Kollisionen ausgeschlossen. Package-Untersuchungen auf alleiniger Basis der Produktmodelle stellen zunächst nur sicher, dass ein theoretischer Einbaupfad für ein Bauteil besteht. Erst durch die Integration des digitalen Menschmodells wird auch die praktische Baubarkeit untersucht. Da Produktentwicklung ohnehin mittels 3D-Software erfolgt, sind keine größeren Bedienungshemmnisse zu erwarten, so dass Entwickler ggf. eigenständig mit dem digitalen Menschmodell arbeiten können.

Während der Produktionsentwicklung werden Arbeitstätigkeiten festgelegt und Mensch-Maschine-Schnittstellen konzipiert. Nunmehr werden vorwiegend die Prozesse betrachtet. Digitale Menschmodelle dienen der Ablaufsimulation hinsichtlich Bau-Reihenfolge, Vorgabezeit, Layoutoptimierung und Belastungsprognose. Arbeitsplätze werden nach Grundsätzen der Anthropometrie, des Komforts sowie der Sicht- und Erreichbarkeit gestaltet. Im Rahmen der iterativen Planungsprozesse helfen digitale Menschsimulationen dabei, Planungsergebnisse zu validieren. Im Ergebnis erhält der Planer den Bedarf an Personal und die Gestaltungsvorgaben der Arbeitsplätze. Die erhöhte Planungsqualität verkürzt die Anlaufphase und dient folglich der Produktivitätserhöhung.

Die Nutzung digitaler Menschsimulationen erweist sich insbesondere während der Durchführung von Planungs-Workshops als geeignetes Werkzeug zur realitätsnahen Darstellung des zu realisierenden Produktionssystems. Sie ermöglicht ein rasches Problemverständnis der Workshopteilnehmer und verhindert Missverständnisse oder Unstimmigkeiten. Planungsdefizite können frühzeitig erkannt und beseitigt werden.
In Anlauf und Serie gibt es zwei weitere Einsatzmöglichkeiten digitaler Menschsimulationen, die Mitarbeiterqualifizierung sowie die Ablaufsimulation zur Prozessoptimierung.
Der Einsatz digitaler Menschmodellierung ist folglich grundsätzlich während des gesamten Produktlebenszyklus möglich, wobei sich drei wesentliche Einsatzgebiete identifizieren lassen (Abbildung 56).

Abbildung 56 - Einsatzgebiete digitaler Menschmodellierung im Produkt-Entstehungs- und Herstellungsprozess

In Kapitel 1 wurde festgestellt, dass digitale Menschsimulationen bislang nicht umfassend eingesetzt werden, weil der Aufwand zur Bewegungserstellung zu hoch ist. In Fallstudien sowohl mittels konventioneller Software als auch mit dem neu entwickelten Editor menschlicher Arbeit wurde der Zeitaufwand ermittelt. Bei konventioneller Bewegungsgenerierung lag der Zeitanteil bei ca. 80% des Gesamtaufwandes. Durch das Verrichtungskonzept und die entwickelte Bewegungssynthese des ema sinkt dieser Anteil auf ca. 30%. Es zeigt sich, dass nun zwar die Simulationserstellung und -auswertung wesentlich schneller möglich sind, jedoch die Arbeitsschritte zur Vorbereitung noch immer aufwendig sind. Insbesondere die Datenbeschaffung stellt sich als Herausforderung dar. 3D-Modelle von Produkten und Ressourcen werden in diversen CAD-Anwendungen erstellt, welche jeweils über eigene Datenformate verfügen. Sämtliche Daten müssen in ein geeignetes Standardformat konvertiert und in Form von Bibliotheken rasch verfügbar gemacht werden.
Die statische Modellierung der Simulationsumgebung, d. h. die Einrichtung der Szene vor der eigentlichen Simulation, kann ebenfalls noch beschleunigt werden. Dies lässt sich erreichen, indem Standard-Arbeitsplätze mit den üblichen

Einrichtungsgegenständen und Ressourcen ebenfalls in einer Bibliothek vorbereitet und anschließend lediglich an die konkreten Anforderungen des Planungsumfanges angepasst werden.
Potential zur Zeitersparnis birgt außerdem die weitere Nutzung der durch die Simulation generierten Daten. Es liegen sowohl eine Prozessbeschreibung als auch Informationen bzgl. Ablaufdauer und Ergonomie vor. Diese Informationen sind wiederum über Schnittstellen in die Folgesysteme zur Arbeitsplanung zu überführen anstatt dort neu erstellt zu werden.
Mit fortschreitendem Reifegrad der Produkt- und Produktionsentwicklung werden ständig neue Datenstände durch die an den Prozessen beteiligten Parteien erstellt. Derzeit fehlt es an Automatismen, um ablaufrelevante Änderungen, die sich auf die bereits simulativ abgesicherten Abläufe auswirken, zu erkennen. Die Folge können Planungsfehler mangels erneuter Simulationsaufbereitung sein. Als Lösung dieses Defizits sind intelligente Bibliothekskonzepte zu entwickeln.

5.3.3 Zusammenfassung

Digitale Menschmodelle können die Ergonomieabsicherung im Produkt-Entstehungs-Prozess unterstützen und vereinfachen.
Initial wird die Simulation zur Absicherung der Baubarkeit angewandt, dabei werden insbesondere bereits aus Vorgänger- und Referenzprojekten bekannte Schwerpunkte untersucht. Alternative Produktkonzepte können mit wenig Aufwand verglichen werden.
Während der Produktionsvorbereitung wird das detaillierte Montagekonzept entwickelt und unmittelbar simulativ abgesichert. Die Ergebnisse bleiben im System erhalten und können bei Änderungen jederzeit angepasst werden, was einen großen Vorteil gegenüber der bisherigen Workshop-Durchführung darstellt.
In der Serienphase steht das digital geplante Modell weiterhin zur Verfügung und kann zur Prozessoptimierung eingesetzt werden. Die Visualisierung stellt außerdem ein mögliches Hilfsmittel zur Mitarbeiterqualifizierung dar.
Die beschriebenen Potentiale können jedoch nur dann wirklich genutzt werden, wenn auch die für den Einsatz der Menschsimulation zur konzeptiven Absicherung der Ergonomie notwendigen Rahmenbedingungen geschaffen werden. Dies betrifft vor allem die Datenbeschaffung und -aktualisierung, in geringem Maße die statische Modellierung der Simulationsumgebung und ferner die Möglichkeit der Weiterverwendung der im Zuge der Simulation entstandenen Daten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Prospektive ergonomische Arbeitsgestaltung ist von zunehmender Wichtigkeit in der Produktionsplanung. Es gilt, arbeitsbedingten Erkrankungen durch die Vermeidung körperlicher Überlastungen vorzubeugen. Digitalen Menschmodellen wird hierfür großes Potential zugesprochen. Bislang werden diese jedoch nicht effizient eingesetzt, da die Bedienung zu aufwendig ist, der Funktionsumfang nicht ausreicht und eine Integration in etablierte Planungsprozesse fehlt. Gegenstand dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung des Funktionsumfangs digitaler Menschmodelle mit dem Ziel der simulationsbasierten Absicherung der Ergonomie mit Hilfe digital beschriebener menschlicher Bewegungen.

Die erste Forschungsfrage bezieht sich auf die Verbesserung der Manipulationsmöglichkeiten zur schnellen Erzeugung dynamischer Simulationen. Anhand einer umfassenden Literaturrecherche wurden dazu drei Hypothesen abgeleitet. Demnach erfolgt menschliche Bewegung innerhalb einer typischen, reproduzierbaren Motorik (Hypothese 1). Folglich lassen sich anhand erfasster realer Bewegungen wiederkehrende Bewegungsmuster ableiten (Hypothese 2) und mittels einer geeigneten Semantik nach arbeitsplanerischen Grundsätzen zur Bewegungssynthese für digitale Menschmodelle nutzen (Hypothese 3). In Kapitel 3 der vorliegenden Arbeit wurde daher eine Methodik zur Aufbereitung digital erfasster menschlicher Bewegungen für die Bewegungsgenerierung entwickelt. Ein hierarchisches Beschreibungsmodell auf Basis komplexer technologischer Verrichtungen ermöglicht eine strukturierte Modellierung menschlicher Bewegungen. In einer ersten Studie wurden 54 Verrichtungen von drei Probanden digital erfasst und ausgewertet. Dabei konnte gezeigt werden, dass zwischen den Wiederholungen der Verrichtungen einerseits und zwischen den drei Probanden andererseits typische, wiederkehrende Muster identifiziert werden können. Die Ergebnisse wurden in einen Software-Demonstrator implementiert und hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft. Bei den Probanden handelte es sich um Laien im Hinblick auf die Ausführung von Montagetätigkeiten, weshalb deren Bewegungen mitunter unnatürlich und teilweise nicht flüssig wirkten. In einer zweiten Studie wurden daher 21 von einem Facharbeiter ausgeführte Verrichtungen untersucht, wobei die Erfassung unter der Anleitung eines Teams von Arbeitsplanern, Ergonomen, Dynamikern und Praktikern erfolgte. Aus den erfassten Bewegungen konnten exemplarisch idealtypische Bewegungsmuster abgeleitet werden, welche mathematisch modelliert und in Algorithmen zur Bewegungssynthese überführt wurden.

Aus den Erkenntnissen der beiden Studien entstand ein vierstufiger, iterativer Prozess zur Bewegungserfassung, -aufbereitung und anschließenden -generierung. Auf dessen Basis können künftig weitere Bewegungen untersucht und algorithmisch

aufbereitet werden. Somit kann eine vollständig algorithmische Bewegungsgenerierung für ein digitales Menschmodell realisiert werden.

Die in Kapitel 4 thematisierte, zweite Forschungsfrage zielte auf die Anreicherung an Analysefunktionen zur ergonomischen Risikoabschätzung mittels digitaler Menschsimulationen. Es wurde angenommen, dass das Vorliegen einer vollständigen Ablaufbeschreibung einer Arbeitstätigkeit eine weitgehend automatische, mehrere Belastungsfaktoren umfassende Ergonomiebewertung ermöglicht (Hypothese 4). Im Hinblick auf arbeitswissenschaftliche Qualitätskriterien sowie grundlegende Praxisanforderungen wurde eine Methode für die Umsetzung ausgewählt. In Vorstudien wurde untersucht, inwieweit digitale Menschsimulationen valide Ergonomiebewertungen ermöglichen und wie sich eine solche Bewertungsmethode softwaretechnisch umsetzen lässt. Auf Basis des European Assembly Worksheet (EAWS) wurde eine semiautomatische Belastungsbewertung konzipiert, die anhand des entwickelten Verrichtungskonzeptes nahezu alle notwendigen Eingangsgrößen automatisch der Simulation entnimmt und nur um wenige manuelle Eingaben ergänzt werden muss.

Die gewonnenen Erkenntnisse zur Bewegungserzeugung wie auch zur automatisierten Ergonomiebewertung flossen in die Entwicklung des Editors menschlicher Arbeit (ema) – einer Software zur Planung und Bewertung manueller Tätigkeiten – ein. Im Rahmen einer abschließenden Studie zur Praxisevaluation wurde untersucht, inwieweit die mit ema erzeugten Simulationen belastbare Vorhersagen zu den geplanten Abläufen und den zu erwartenden physischen Belastungen ermöglichen. Zunächst dienten fiktive Szenen der Überprüfung der korrekten EAWS-Implementierung. Anschließend wurden zwölf Beispielszenarien von drei Experten hinsichtlich der humanmotorischen Richtigkeit beurteilt und die EAWS-Bewertungen der drei Beobachter mit den automatisch erzeugten Bewertungen verglichen.

Nach Abschluss der Studie konnte bestätigt werden, dass die bislang implementierten EAWS-Module 0-3 formal korrekt umgesetzt wurden. Die qualitative Einschätzung der Experten zur Humanmotorik der Simulationen zeigte, dass ema als Werkzeug zur Planung und Ergonomieabsicherung angewandt werden kann. Anhand des Vergleichs der manuellen und automatisiert gewonnenen Ergonomiebewertungen konnte die Vorhersagegüte von ema beurteilt werden. Es wurde ein mittlerer, signifikanter Zusammenhang ermittelt. Abweichungen resultierten einerseits aus verstärkten Bewertungen asymmetrischer Körperhaltungen und andererseits aus der fälschlichen Interpretation von Ganzkörperkräften als Fingerkräfte. Die Erkenntnisse wurden an die Softwareentwicklung übermittelt und fließen in die Weiterentwicklung künftiger Versionen ein. Insgesamt bestätigte die Studie die Praxistauglichkeit des ema für die Plausibilisierung von Planungsalternativen sowie zur präventiven Ergonomiebewertung.

6.2 Ausblick

Die vorgestellten Untersuchungen zur Bewegungserfassung und -analyse erfolgten auf Basis ausgewählter Verrichtungen und decken keinesfalls alle denkbaren Bewegungsmuster ab. Die Bewegungserfassung nur eines Probanden ermöglicht darüber hinaus keine statistische Absicherung der Ergebnisse. Im Sinne einer Vervollständigung sind künftig weitere Studien unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.5 entwickelten Methodik durchzuführen, wobei folgende Aspekte zu berücksichtigen sind:

- Auswahl eines geeigneten Probandenkollektivs: Sinnvoll ist die Erfassung von mehr als einem Probanden. Dabei ist eine Aufnahme verschiedener Probandengruppen (Geschlecht, Alter, Perzentil, Nationalität) zu empfehlen, um diese Unterschiede in der Planung berücksichtigen zu können. Dies ist bislang nicht erfolgt, da zunächst die Entwicklung der methodischen Vorgehensweise im Vordergrund stand und ferner die Kapazitäten hinsichtlich Zeit und Personal im Rahmen des Forschungsprojekts begrenzt waren.
- Aufnahme unter realen Arbeitsbedingungen: Die humanmotorisch korrekte Bewegungsausführung lässt sich so am besten gewährleisten. Denkbar ist bspw. die Aufnahme in Pilothallenbereichen, welche zumeist über nachgebaute Linienabschnitte verfügen und wo reale Produkte zur Verfügung stehen. Reale Arbeitsbedingungen bedeuten auch eine längere Exposition mit vorhandenen Belastungen. Zu untersuchen ist daher, ob sich das Bewegungsverhalten im Laufe einer Schichtdauer verändert.
- Erweiterung des Diskursbereiches um Komplexverrichtungen, Ergänzung der Parametrierung um variierende Ausführungsbedingungen: Um tatsächlich nahezu alle gängigen Bewegungen simulativ absichern zu können, müssen weitere Bewegungen, etwa mit sperrigen oder empfindlichen Bauteilen sowie unter anderen Bedingungen, bspw. Überkopfarbeit, erfasst werden. Spezialbewegungen wie Einstiegvorgänge sollten die Verrichtungsbibliothek erweitern. Darüber hinaus ist zu untersuchen, wie die Übergänge zwischen Verrichtungen erfolgen. In den Studien wurden isolierte Verrichtungen erfasst und untersucht, nicht aber die kombinierte Ausführung mehrerer Verrichtungen.

Das bisher erprobte Vorgehen zur Auswertung der erfassten Bewegungen ist sehr aufwendig, da die Datenaufbereitung vorwiegend manuell erfolgt. Wenn eine größere Anzahl an Aufnahmen durchgeführt werden soll, so ist der Prozess der Datenaufbereitung zu automatisieren, so dass der Zeitaufwand für reine Datenverarbeitungsvorgänge erheblich reduziert wird.
Die auf Basis der gewonnen Erkenntnisse entstandene Softwarelösung Editor menschlicher Arbeit (ema) wurde bereits mehrfach produktiv eingesetzt. Längerfristig

ausgelegte Validierungsstudien fehlen bislang jedoch. Im Rahmen eines realen Planungsprojektes ist eine Längsschnittuntersuchung möglich, um die Vorhersagequalität der Bewegungssimulation abzusichern. Ferner ist die implementierte, semiautomatische Ergonomiebewertung weiterzuentwickeln. Einerseits erlauben zusätzliche Verrichtungen, bspw. das Einsteigen in den Fahrzeuginnenraum, auch eine automatisierte Bewertung von Modul 0. Andererseits ist das bislang fehlende Modul 4 ebenfalls umzusetzen, um eine vollständige Risikoabschätzung zu ermöglichen.

Im Hinblick auf den Gesamtbereich der digitalen Fabrik sind Überlegungen bezüglich der Integration der entwickelten Software notwendig. Somit können Informationsverluste vermieden und der notwendige Aufwand an Zeit und Ressourcen verringert werden.

Literatur

ArbSchG, §5, idF v. 05.02.2009 (2009).

ar-tracking.com. (2012). Abgerufen am 4. April 2012 von http://www.ar-tracking.com/uploads/pics/IR-tracking_operation-principle.png

Abdel-Malek, K., & Arora, J. (2009). Physics-Based Digital Human Modeling: Predictive Dynamics. In V. G. Duffy, *Handbook of Digital Human Modeling* (S. 5-1 - 5-33). Boca Raton: CRC Press.

Alexander, R. M. (1997). A minimum energy cost hypothesis for human arm trajectories. *Biological Cybernetics Volume 76*, S. 97-105.

Alexander, T. (2010). Funktionale Analyse und Modellierung der zeilgerichteten Armbewegung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 02/2010*, S. 77-88.

Arlt, F. (1999). *Untersuchung zielgerichteter Bewegungen zur Simulation mit einem CAD-Menschmodell. Dissertation.* München: Herbert Utz Verlag.

Arndt, H. (2008). *Supply Chain Management - Optimierung logistischer Prozesse.* Wiesbaden: Gabler.

Arnold, R., & Schönherr, R. (2012). Ganzheitliches Beschreibungsmodell der Digitalen Fabrik im Anlauf als Schnittstelle zwischen Planung und Serie. In E. Müller, & A. Bullinger-Hoffmann, *VPP2012 Vernetzt planen und produzieren & Symposium Wissenschaft und Praxis. Intelligent vernetzte Arbeits- und Fabriksysteme* (S. 73-82). Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme.

Aubry, M., Julliard, F., & Gibet, S. (2009). Modeling Joint Synergies to Sythesize Realistic Movements. In S. Kopp, & I. Wachsmuth, *Gesture in Embodied Communication and Human-Computer Interaction* (S. 231-242). Berlin: Springer.

Awiszus, B., Bast, J., Dürr, H., & Matthes, K.-J. (2003). *Grundlagen der Fertigungstechnik.* München: Carl Hanser Verlag.

Badler, N., Phillips, C. B., & Webber, B. L. (1999). *Simulating Humans: Computer Graphics, Animation, and Control.* Oxford : Oxford University Press.

Baracco, A., Bruder, R., Caragnano, G., Lavatelli, I., Romano, C., Schaub, K., & Tassinari, A. (2009). *EAWS User Manual.*

Bauer, M., Kittel, W., & Paulus, M. (2004). Verbesserung der Produktivität und Qualität durch sicherheitsgerechte und gesindheitsfördernde Arbeits- und Organisationsgestaltung im Automotive-Bereich. *Sicherheitsingenieur 10/2004*, S. 30-37.

Bauer, S. (2006). *Entwicklung einer prototypischen Software zur Planung und Visualisierung manueller Tätigkeiten. Diplomarbeit.* Technische universität Chemnitz.

Bauer, S. (2011). Analyse / Entwurf eines hierarchischen Systems von Bewegungsebenen zur Gliederung und späteren Neukombination von

Teilbewegungen. In imk automotive GmbH, *System zur Abbildung handlungsbezogener Informationen auf geometriebezogene Bewegungsdaten. Sachbericht zum Verbundprojekt System zur Bewegungssynthese für digitale Menschmodelle* (S. 13-15). Chemnitz.

Beck, M., & Frölich, W. (2010). Durchgängiger Ergonomieprozess in Planung und Produktion. In *Mensch- und prozessorientierte Arbeitsgestaltung im Fahrzeugbau: Herbstkonferenz 2010 der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 83-86). Dortmund: GfA-Press.

Beevis, D., & Slade, I. M. (2003). Ergonomics - costs and benefits. *Applied Ergonomics, 34*, S. 413-418.

Berufsgenossenschftliches Institut für Arbeitsschutz - BGIA. (2005). *Fachgespräch Ergonomie 2004.*

Beth, T., Boesnach, I., Haimerl, M., Moldenhauer, J., Bös, K., & Wank, V. (2002). Analyse, Modellierung und Erkennung menschlicher Bewegungen. In *1. SFB-Aussprachetag Human Centered Robotics (HCRS) 2002, 5.–6. Dezember 2002, Tagungsband* (S. 17-24). Karlsruhe: Universität Karlsruhe.

Blickhan, R. (1997). Bewegungskontrolle imd Kinetik. In B. &. (Hrsg.), *Biomechnaik und Motorik - Nachwuchsworkshop der dvs-Sektionen Biomechanik und Sportmoitorik vom 9. - 13.10.1995 in Jena.* Hamburg: Czwalina.

Bokranz, R., & Landau, K. (2006). *Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen.* Stuttgart: Schäffer-Poeschel-Verlag.

Bortot, D., Ding, H., Günzkofer, F., Stengel, D., Bengler, K., Schiller, F., & Stursberg, O. (2010). Effizienzsteigerung durch die Bewegungsanalyse und -modellierung der Mensch-Roboter-Kooperation. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 02/2010*, S. 65-75.

Bortz, J., & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler.* Heidelberg: Springer Medizin Verlag.

Bracht, U., & Spillner, A. (2009). Die Digitale Fabrik ist Realität - Ergebnisse einer Umfrage zum Umsetzungsstand und zu weiteren Entwicklungen der Digitalen Fabrikplanung bei deutschen OEM. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 7-8*, S. 648-653.

Bracht, U., Geckler, D., & Wenzel, S. (2011). *Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele.* Berlin: Springer.

Brunner, D. (2007). *Skelettierung von 3d-Objekten auf kubisch-raumzentrierten Gittern und deren Anwendung in der Segmentierung, Manipulierung und Klassifizierung. Dissertation.* Chemnitz: Technische Universität Chemnitz.

Brunner, F. J., & Wagner, K. W. (2004). *Taschenbuch Qualitätsmanagement.* München: Carl Hanser Verlag.

Bubb, H., & Fritzsche, F. (2009). A Scientific Perspective of Digital Human Models: Past, Present, and Future. In V. G. Duffy, *Handbook of Digital Human*

Modeling. Research for Applied Ergonomics and Human Factors Engineering (S. 3-1 - 3-30). Boca Raton: CRC Press.

Bubb, H., & Seifert, R. (1993). Struktur des Mensch-Maschine-Systems. In H. Bubb, *Menschliche Zuverlässigkeit* (S. 18-20). Landsberg: ecomed-Fachverlag.

Bullinger, H.-J. (. (1986). *Systematische Montageplanung. Handbuch für die Praxis.* München: Hanser.

Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS). (2012). *Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit 2010.* Berlin.

Burandt, U. (1978). *Ergonomie für Design und Entwicklung.* Köln: Dr. Otto Schmidt KG.

Caffier, G., Steinberg, U., & Liebers, F. (1999). *Praxisorientiertes Methodeninventar zur Belastungsbeurteilung im Zusammenhang mit arbeitsbedingten Muskel-Skelett-Erkrankungen.* Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Chaffin, D. B. (1969). A Computerized Biomechanical Model: Development and Use in Studying Gross Body Actions. *Journal of Biomechanics, 2*, S. 429-441.

Chaffin, D. B. (2001). *Digital Human Modeling for Vehicle and Workplace Design.* Warrendale: SAE Society of Automtoive Engineers.

Chaffin, D. B. (2005). Improving Digital Human Modeling for Proactive Ergonomics in Design. *Ergonomics, 48*, S. 478-491.

Clark, K. B., & Fujimoto, T. (1991). *Product development performance - strategy organization, and management in the world auto industry.* Boston: Harvard Business School Press.

Cole, D. C., Ibrahim, S. A., Shannon, H. S., Scott, F., & Eyles, J. (2001). Work correlates of back problems and activity restriction due to musculoskeletal disorders in the Canadian national population health survey (NPHS) 1994–5 data. *Occupational and Environmental Medicine, 58*, S. 728-734.

Colombini, D., Occhipinti, E., & Grieco, A. (2002). *Risk Assessment and Management of Repetitive Movements and Exertions of Upper Limbs.* Amsterdam: Elsevier.

Conradi, J., & Alexander, T. (2008). Evaluation eines digitalen anthropometrischen Menschmodells zum Design von Konsolenarbeitsplätzen. In L. Schmidt, J. Grosche, & C. Schlick, *Ergonomie und Mensch-Maschine-Systeme* (S. 235-252). Berlin: Springer.

Dassault Systemes. (2012). Abgerufen am 3. April 2012 von http://www.3ds.com/products/delmia/solutions/human-modeling/

DELMIA. (2007). China Motor Corporation Develops a Fast and Simple DELMIA V5 Human Automatic Animator. *DELMIA World News, 15*, S. 21-22.

Deutsche MTM-Vereinigung e. V. (2012). Abgerufen am 02. April 2012 von https://www.dmtm.com/produkte/ausbildung/engineer-eaws.php

Deutscher Bundestag. (2009). *Bericht der Bundesregierung über den Stand von Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit und über das Unfall- und Berufskrankheitengeschehen in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2009.*

Deutsches Institut für Normung. (1987). *DIN 33408-1. Körperumrißschablonen für Sitzplätze.* Berlin: Beuth.

Deutsches Institut für Normung. (2003). *DIN 8580. Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung.* Berlin: Beuth.

Deutsches Institut für Normung. (2005). *DIN EN ISO 9000. Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe.* Berlin: Beuth.

Deutsches Institut für Normung. (2009). *DIN EN 1005-2. Sicherheit von Maschinen - Menschliche körperliche Leistung - Teil 2: Manuelle Handhabung von Gegenständen in Verbindung mit Maschinen und Maschinenteilen.* Berlin: Beuth.

Deutsches Institut für Normung. (2009). *DIN EN 1005-4. Sicherheit von Maschinen - Menschliche körperliche Leistung - Teil 4: Bewertung von Körperhaltungen und Bewegungen bei der Arbeit an Maschinen.* Berlin: Beuth.

Deutsches Institut für Normung. (2009). *DIN EN 614-1. Sicherheit von Maschinen - Ergonomische Gestaltungsgrundsätze - Teil 1: Begriffe und allgemeine Leitsätze.* Berlin: Beuth.

Diaz Meyer, M. (2008). *Modellierung von Bewegungen und ihre Auswirkungen auf den Menschen bei der Handhabung delikater Objekte.* Stuttgart: ergonomia.

Dietz, M., & Walwei, U. (2007). *Fachkräftebedarf der Wirtschaft. Wissenschaftliche Befunde und Forschungsperspektiven.* Nürnberg: Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung.

Duffy, V. G. (2009). *Handbook of Digital Human Modeling. Research for Applied Ergonomics and Human Factors Engineering.* Boca Raton: CRC Press.

Eberle, G., Kraemer, R., & Lück, P. (2005). *Wirtschaftlicher Nutzen Betrieblicher Gesundheitsförderung aus Sicht von Unternehmen. Dokumentation einer Befragung.* Bonn: AOK Bundesverband (Hrsg.).

Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., & Lindemann, U. (1998). *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren.* Berlin: Springer.

Eigner, M., & Stelzer, R. (2009). *Product Lifecycle Management - Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management.* Berlin: Springer.

Eklund, J. A. (1995). Relationships between ergonomics and quality in assembly work. *Applied Ergonomics. Volume 26, Issue 1*, S. 15-20.

Eklund, J. A. (1997). Ergonomics, quality and cintinuous improvement - conceptual and empirical relationship in an industrial context. *Ergonomics, 40*, S. 982-1001.

Engstler, F. (2006). Virtual Reality als Hilfsmittel zur Beantwortung ergonomischer Fragestellungen. *Ergonomie aktuell, 007*, S. 21-22.

Fahlbusch, M. (2001). *Einführung und erste Ansätze von Virtual Reality-Systemen in der Fabrikplanung.* Aachen: Shaker.

Feldmann, K., Sutano, A., & Brossog, M. (2005). Der virtuelle Darwin. *Zukunft im Brennpunkt, 4*, S. 85-90.

Fireman, J., & Lesinski, N. (2009). *Virtual Ergonomics: Taking Human Factors into Account for Improved Product and Process. Whitepaper.* Dassault Systemes.

Fischer, O., & Braune, C. W. (1899). *Der Gang des Menschen.* Leipzig: B. G. Teubner.

Flash, T., Hogan, N., & Richardson, M. J. (1995). Optimization Principles In Motor Control. In M. A. Arbib, *The handbook of brain theory and neural networks* (S. 827-835). Massachusetts : Massachusetts Institute of Technology.

Fraunhofer IAO. (2007). *Jahresbericht 2006.*

Fritzsche, L. (2010). Good Ergonomics is Good Economics – Empirische Belege zum Zusammenhang zwischen ergonomischer Arbeitsplatzgestaltung und Produktivität in der PKW-Montage. Vortrag auf der MTM-Anwenderkonferenz. Heilbronn.

Fritzsche, L. (2010). *Work Group Diversity and Digital Ergonomic Assessment as New Approaches for Compensating the Aging Workforce in Automotive Production. Dissertation.* Dresden: Technische Universität Dresden.

Fritzsche, L., & Jendrusch, R. (2009). Prospektive Arbeitsgestaltung mit digitalen Menschmodellen – Validität der Ergonomiebewertung von simulierten Arbeitsabläufen in der Automobilmontage. In *Arbeit, Beschäftigungsfähigkeit und Produktivität im 21. Jahrhundert. 55. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 583-587). Dortmund: GfA-Press.

Fritzsche, L., Jendrusch, R., Leidholdt, W., Bauer, S., Jäckel, T., & Pirger, A. (2011). Introducing ema (Editor for Manual Work Activities) – A New Tool for Enhancing Accuracy and Efficiency of Human Simulations in Digital Production Planning. In V. Duffy, *Digital Human Modeling, HCII 2011, LNCS 6777* (S. 272–281). Berlin: Springer.

Fritzsche, L., Klippert, J., Hildebrandt, A., Gudehus, T., Zick, J., Lange, K.-H., . . . Kohler, P. (2007). Innovative Methoden zur frühzeitigen Simulation ergonomischer Bedingungen für partizipative Produktionsplanungsprozesse. In *Bericht zum 53. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 28.2.-2.3.2007 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg* (S. 825-828). Dortmund: GfA-Press.

Fröhmel, C. (2010). *Validierung des RAMSIS-Krafthaltungsmodells. Dissertation.* Technische Universität München.

Gattringer, H. (2011). *Starr-elastische Robotersysteme.* Heidelberg: Springer.

Gausemeier, J., Plass, C., & Wenzelmann, C. (2009). *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung - Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen.* München: Carl Hanser Verlag.

Geckler, D., & Rehnelt, C. (2004). Die "Digitale Fabrik" als neue Wissensdrehscheibe zwischen OEM und Zulieferer. *Projektmanagement aktuell, 1/2004*, S. 26-30.

Geiler, P. (2010). *Analyse und Strukturierung ausgewählter Verrichtungen menschlicher Arbeit zur algorithmischen Abbildung. Bachelorarbeit.* Jena: Fachhochschule Jena.

Ghezel-Ahmadi, K., & Schaub, K. (2007). Bewertung der körperlichen Belastungen am Arbeitsplatz mit dem IAD-BkB® im Rahmen des ERA-Tarifwerks. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft,61*, S. 255-262.

Gibet, S., & Marteau, P.-F. (2003). Expressive Gesture Animation Based on Non Parametric Learning of Sensory-Motor Models. *Proceedings of the 16th International Conference on Computer Animation and Social Agents (CASA'03)* , (S. 465-472). New-Brunswick.

Godin, C., & Chiang, J. (2009). The Use of Digital Human Models for Advanced Industrial Applications. In V. G. Duffy, *Handbook of Digital Human Modeling. Research for Applied Ergonomics and Human Factors Engineering* (S. 39-1 - 39-15). Boca Raton: CRC Press.

Göhner, U. (1987). *Bewegungsanalyse im Sport.* Schorndorf: Verlag Karl Hofmann.

Götze, U. (2000). *Kostenrechnung und Kostenmanagement.* Chemnitz: Verlag der Gesellschaft für Unternehmensrechnung und Controlling.

Grote, K.-H., & Feldhusen, J. (2011). *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau.* Berlin: Springer.

Grundig, C.-G. (2009). *Fabrikplanung - Planungssystematik, Methoden, Anwendungen.* München: Carl Hanser Verlag.

Gudehus, T. (2008). *Entwicklung eines Verfahrens zur ergonomischen Bewertung von Montagetätigkeiten durch Motion Capturing. Dissertation.* Kassel: Kassel University Press.

Gumpert, N. (2012). *Doktor Gumpert*. Abgerufen am 5. September 2012 von http://www.dr-gumpert.de/html/bewegungswissenschaft.html

Hacker, W. (1986). *Arbeitspsychologie: Psychische Regulation der Arbeitstätigkeiten.* Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.

Haggard, P., Leschziner, G., Miall, R. C., & Stein, J. F. (1997). Local learning of inverse kinematics in human reaching movement. *Human Movement Science, 16*, S. 133-147.

Heckhausen, J., & Heckhausen, H. (2010). *Motivation und Handeln.* Berlin: Springer.

Hendrick, H. W. (1996). Good Ergonomics Is Good Economics. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 40th annual meeting.* Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.

Hendrick, H. W. (2003). Determining the cost-benefits of ergonomics projects and factors that lead to their succes. *Applied Ergonomics, 34*, S. 419-427.

Hensel-Unger, R. (2011). *Entwicklung einer Gestaltungssystematik für das Industrial Engineering (IE) : unter besonderer Berücksichtigung kultureller Einflussfaktoren am Beispiel von Tschechien und Polen. Dissertation.* Chemnitz: Universitätsverlag Chemnitz.

Herzberg, F., Mausner, B., & Snyderman, B. B. (1959). *The Motivation to Work.* New York: Wiley.

Hoffmeyer, A. (2010). Industrieller Einsatz von Motion Capturing zur Unterstützung von Planungsworkshops bei der Volkswagen AG. In *Tagungsband Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme, 13. IFF-Wissenschaftstage 15.-17. Juni 2010* (S. 245-264). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Human Solutions. (2012). Abgerufen am 3. April 2012 von http://www.human-solutions.com/mobility/front_content.php?idcat=252

Hüttmann, K. (2004). Ergonomieprozesse in der Produktion eines Automobilherstellers am Beispiel des Opel-Werkes Rüsselsheim. In K. Landau, *Montageprozesse gestalten - Fallbeispiele aus Ergonomie und Organisation.* Stuttgart: Ergonomia.

Ilmarinen, J. (2006). The ageing workforce - challenges for occupational health. *Occupational Medicine, 56*, S. 362-364.

Institut für Arbeitswissenschaft Darmstadt IAD. (2009). *European Assembly Worksheet (V 1.3.2c).*

Institut für Mechatronik e. V. (2009). *alaska 6.0: Modellierung und Simulation mechatronischer Systeme. Benutzerhandbuch.* Chemnitz.

Institut für Mechatronik e. V. (2009). *Dynamicus: Biomechanisches Menschmodell. Benutzerhandbuch.* Chemnitz.

Institut für Mechatronik e. V. (2012). *alaska/Dynamikus. Biomechanisches Modell für die Bewegungsanalyse.* Abgerufen am 4. April 2012 von http://www.tu-chemnitz.de/ifm/produkte-medien/alaskaDYNAMICUS.pdf

Jackèl, D., Neunreither, S., & Wagner, F. (2006). *Methoden der Computeranimation.* Berlin: Springer.

Jacob, H., Toledo Muñoz, B., Busche, C., & Jendrusch, R. (2010). Durchgängige Ergonomieabsicherung im Produktentstehungsprozess bei Volkswagen. In *Mensch- und prozessorientierte Arbeitsgestaltung im Fahrzeugbau: Herbstkonferenz 2010 der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 63-68). Dortmund: GfA-Press.

Jendrusch, R. (2008). *Validität der Ergonomiebewertung mit digitalen Menschsimulationen. Diplomarbeit.* Professur Arbeitswissenschaft, Technische Universität Chemnitz.

Jendrusch, R. (2012). Einsatz digitaler Menschmodelle im Produkt-Entstehungs- und Herstellungsprozess. In *Gestaltung nachhaltiger Arbeitssystme. 58. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 169-172). Dortmund: GfA-Press.

Jendrusch, R., & Bauer, S. (2010). Der virtuelle Facharbeiter nimmt seine Arbeit auf. *Tagungsband Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme* (S. 200-206). Magdeburg: Fraunhofer Verlag.

Jendrusch, R., Leidholdt, W., Bauer, S., Hermsdorf, H., Hofmann, N., Keil, A., & Spanner-Ulmer, B. (2011). Algorithmische Bewegungsgenerierung und semiautomatische Ergonomiebewertung für digitale Menschmodelle. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 03/2011*, S. 259-271.

Jendrusch, R., Pirger, A., & Fritzsche, L. (2011). Semiautomatische Ergonomiebewertung mit dem Editor menschlicher Arbeit (ema). In *Mensch, Technik, Organisation - Vernetzung im Produktentstehungs- und -herstellungsprozess. 57. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 641-644). Dortmund: GfA-Press.

Jürgens, U. (2007). *Warum Toyota so lange so stark ist. Bericht im Auftrag der IG Metall.* Darmstadt: APM.

Jürgens, W.-W., Mohr, D., Pangert, R., Pernack, E.-F., Schultz, K., & Steinberg, U. (2001). *Handlungsanleitung zur Beurteilung der Arbeitsbedingungen beim Heben und Tragen von Lasten.* Saarbrücken: Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI).

Jürgens, W.-W., Mohr, D., Pangert, R., Pernack, E.-F., Schultz, K., & Steinberg, U. (2002). *Handlungsanleitung zur Beurteilung der Arbeitsbedingungen beim Ziehen und Schieben von Lasten.* Saarbrücken: Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI).

Kamusella, C. (2012). Ergotyping-Tool "Körperhaltungsbewertung". In *Gestaltung nachhaltiger Arbeitssysteme. 58. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 177-180). Dortmund: GfA-Press.

Kamusella, C., & Ördögh, L. (2011). Ergotyping-Tool "Körperkräfte". In *Mensch, Technik, Organisation - Vernetzung im Produktentstehungs- und -herstellungsprozess. 57. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 623-626). Dortmund: GfA-Press.

Kamusella, C., & Schmauder, M. (2009). Ergotyping im rechnerunterstützten Entwicklungs- und Gestaltungsprozess. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 3/2009*, S. 212-222.

Kamusella, C., & Schmauder, M. (2010). Ergotyping-Tool „Sichtbewertung“. In *Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten. 56. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 135-138). Dortmund: GfA-Press.

Karhu, O., Kansi, P., & Kuorinka, I. (1977). Correcting working postures in industry: A practical method for analysis. *Applied Ergonomics, 8*, S. 199-201.

Keil, A., Härtel, T., Toledo Muñoz, B., Busche, C., & Hoffmeyer, A. (2010). Berücksichtigung der zeitlichen Komponente bei einer Ergonomiesimulation. In *Mensch- und prozessorientierte Arbeitsgestaltung im Fahrzeugbau. Herbstkonferenz 2010 der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, 23.-24. September 2010* (S. 105-121). Dortmund: GfA-Press.

Keppler, V. (2003). *Biomechanische Modellbildung zur Simulation zweier Mensch-Maschinen-Schnittstellen. Dissertation.* Tübingen.

Klippert, J., Fritzsche, L., Gudehus, T., Zick, J., Steck, S. D., Ehler, R., . . . Schaub, K. (2008). Motion Capturing for Preventive Ergonomic Assessment - Possibilities and Challenges for Practical Application. In *Produkt- und Produktionsergonomie - Aufgabe für Entwickler und Planer. 54. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswisenschaft* (S. 891-894). Dortmund: GfA-Press.

Koether, R., Kurz, B., Seidel, U. A., & Weber, F. (2001). *Betriebsstättenplanung und Ergonomie. Planung von Arbeitssystemen.* München: Hanser.

Kromrey, H. (2001). Evaluation - ein vielschichtiges Konzept. Begriff und Methodik von Evaluierung und Evaluationsforschung. Empfehlungen für die Praxis. *Sozialwissenschaften und Berufspraxis, 24. Jg., 2/2001*, S. 105-132.

Kromrey, H. (2005). Evaluation – ein Überblick. In H. Schöch, *Was ist Qualität? Die Entzauberung eines Mythos* (S. 31-85). Berlin: Wissenschaftlicher Verlag.

Kuchling, H. (2001). *Taschenbuch der Physik.* Leipzig: Carl Hanser Verlag.

Kugler, M., Schaub, K., Sinn-Behrendt, A., Ghezel-Ahmadi, K., Bierwirth, M., & Bruder, R. (2009). Primärprävention durch konzeptive Ergonomie. Das Projekt KoBRA am Beispiel eines Unternehmensteilprojektes. In *Arbeit, Beschäftigungsfähigkeit und Produktivität im 21. Jahrhundert. 55. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 415-418). Dortmund: GfA-Press.

Kühn, W. (2006). *Digitale Fabrik. Fabriksimulation für Produktionsplaner.* München: Carl Hanser.

Landau, K. (2007). *Lexikon Arbeitsgestaltung. Best Practice im Arbeitsprozess.* Stuttgart: Gentner.

Landau, K., Luczak, H., & Laurig, W. (1997). *Software-Werkzeuge zur ergonomischen Arbeitsgestaltung.* Bad Urach: IFAO.

Laring, J., Christmansson, M., Kadefors, R., & Örtengren, R. (2005). ErgoSAM: A Preproduction Risk Identification Tool. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, 15*, S. 309-325.

Lawaczek, M. (2001). *Zur ergonomischen Beurteilung von Montagetätigkeiten in der Automobilindustrie.* Stuttgart: ERGON.

Leidholdt, W., & Bauer, S. (2009). Der virtuelle Facharbeiter (Editor menschlicher Arbeit). In *Tagungsband Digitales Engineering zum Planen, Testen und*

Betreiben technischer Systeme. 6. Fachtagung zur Virtual Reality. 12. IFF-Wissenschaftstage (S. 289-298). Magdeburg: Fraunhofer IFF.

Leidholdt, W., Fischer, H., & Mühlstedt, J. (2010). Simulation der menschlichen Arbeit - gegen Arbeitshetze und Stress. In E. Müller, & B. (. Spanner-Ulmer, *4. Symposium Wissenschaft und Praxis & 8. Fachtagung Vernetzt planen und produzieren (VPP2010). Nachhaltigkeit in Planung und Produktion* (S. 71-83). Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme.

Leidholdt, W., Jendrusch, R., & Fritzsche, L. (2011). Der Humanmotorik auf der Spur - Algorithmische Bewegungsgenerierung Digitaler Menschmodelle. In *Mensch, Technik, Organisation - Vernetzung im Produktentstehungs- und -herstellungsprozess. 57. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 607-610). Dortmund: GfA-Press.

Li, Z. (2009). Digital Human Modelling Packages. In V. G. Duffy, *Handbook of Digital Human Modeling. Research for Applied Ergonomics and Human Factors Engineering* (S. 54-1 - 54-21). Boca Raton: CRC Press.

Lin, L., Drury, C. G., & Kim, S.-W. (2001). Ergonomics and Quality in Paced Assembly Lines. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, 11*, S. 377-382.

Lins, F., & Britzke, B. (2010). Standardisierung und Ergonomie. In *Mensch- und prozessorientierte Arbeitsgestaltung im Fahrzeugbau. Herbstkonferenz 2010 der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 29-42). Dortmund: GfA-Press.

Liu, C., Hertzmann, A., & Popovic, Z. (2005). Learning physics-based motion style with nonlinear inverse optimization. *SIGGRAPH 2005, The 32nd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, (S. 1071-1081). Los Angeles.

Loosch, E. (1999). *Allgemeine Bewegungslehre.* Wiebelsheim: Limpert.

Luczak, H. (1991). *Arbeitswissenschaft. Konzepte, Arbeitspersonen, Arbeitsformen, Arbeitsumgebung.* Berlin: Papyrus Druck.

Luczak, H. (1991). *Arbeitswissenschaft. Systematik, Arbeitsschutz, Arbeitsgestaltung, Arbeitswirtschaft.* Berlin: Papyrus Druck.

Luczak, H., Volpert, W., Raeithel, A., Schwier, W., Müller, T., & Rötting, M. (1989). *Arbeitswissenschaft, Kerndefinition – Gegenstandskatalog – Forschungsgebiete.* Eschborn: RKW.

Maslow, A. (1954). *Motivation and Personality.* New York: Harper & Row.

McAtamney, L., & Corlett, E. (1993). RULA: a survey method for the irwestigation of world-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics, 24*, S. 91-99.

McCracken, T. O. (1999). *Der 3D Anatomie Atlas.* Augsburg: Weltbild Verlag.

Mechling, H. (2003). Zu Gegenstand und Geschichte der Bewegungswissenschaft. In H. Mechling, & J. Munzert, *Handbuch Bewegungswissenschaft - Bewegungslehre.* Schorndorf: Verlag Karl Hofmann.

Moen, R., & Norman, C. (2006). *Evolution of the PDCA Cycle*. Abgerufen am 4. April 2012 von http://pkpinc.com/files/NA01_Moen_Norman_fullpaper.pdf

Morr, D. R., Wiechel, J. F., & Metzler, S. A. (2009). Instrumentation in Support of Dynamic Digital Human Modeling. In V. G. Duffy, *Handbook of Digital Human Modeling. Research for Applied Ergonomics and Human Factors Engineering* (S. 33-1 - 33-34). Boca Raton: CRC Press.

Motus, D. (2009). *Referenzmodell für die Montageplanung in der Automobilindustrie. Dissertation.* München: Herbert Utz Verlag.

Mühlstedt, J. (2011). *Entwicklung eines Modells dynamisch-muskulärer Arbeitsbeanspruchungen auf Basis digitaler Menschmodelle. Dissertation.* Chemnitz: Universitätsverlag Chemnitz.

Mühlstedt, J., & Spanner-Ulmer, B. (2009). Homo Sapiens Digitalis: über den Praxiseinsatz digitaler Menschmodelle. In A. Lichtenstein, C. Stößel, & C. Clemens, *8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme* (S. 7-8). Düsseldorf: VDI Verlag.

Mühlstedt, J., Kaußler, H., & Spanner-Ulmer, B. (2008). Programme in Menschengestalt: Digitale Menschmodelle für CAx und PLM-Systeme. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 02/2008*, S. 79-86.

Näser, P. (2007). *Methode zur Entwicklung und kontinuierlichen Verbesserung des Anlaufmanagements komplexer Montagesysteme. Dissertation.* Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme.

Naumann, A., & Israel, J. H. (2006). Potenzial der Anwendung von VR-Interaktionstechniken im Usability-Testing. *MMI-Interaktiv, 11*, S. 85-97.

Nitsch, J. R. (1986). Zur handlungstheoretischen Grundlegung der Sportpsychologie. In H. Gäbler, & J. R. Nitsch, *Einführung in die Sportpsychologie. Teil 1: Grundthemen* (S. 188-270). Schorndorf: Verlag Karl Hofmann.

Ohno, T. (1993). *Das Toyota-Produktionssystem.* Frankfurt am Main: Campus.

Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K.-H. (2004). *Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung.* Berlin: Springer.

Park, W. (2003). *Memory-based Human Motion simulation. Dissertation.* Michigan: University of Michigan.

Paulsen, F., & Waschke, J. (2010). *Sobotta Atlas der Anatomie des Menschen.* München: Elsevier.

Pawellek, G. (2008). *Ganzheitliche Fabrikplanung: Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung .* Berlin: Springer.

Raschke, U., Kuhlmann, H., & Hollick, M. (2005). On the Design of a Task Based Human Simulation System. *SAE transactions, 114*, S. 760-766.

REFA Bundesverband e. V. (2002). *Ausgewählte Methoden zur prozessorientierten Arbeitsorganisation.* Darmstadt: REFA.

Reinberg, A., & Hummel, M. (2003). *Steuert Deustchland langfristig auf einen Fachkräftemangel zu?* Nürnberg: Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung.

Reinhart, G., & Zäh, M. F. (2003). *Marktchance Individualisierung.* Berlin: Springer.

Reinhart, G., Schack, R., & Müller, S. (2006). Anwendungsorientierte Lösungen für die Digitale Fabrik: Mit Durchhaltevermögen zum Erfolg. *Werkstatt + Betrieb, 9/2006*, S. 2-6.

Riege, C., Saat, J., & Bucher, T. (2009). Systematisierung von Evaluationsmethoden in der gestaltungsorientierten Wirtschaftsinformatik. In J. Becker, H. Krcmar, & B. Niehaves (Hrsg.), *Wissenschaftstheorie und gestaltungsorientierte Wirtschaftsinformatik* (S. 69-86). Heidelberg: Physica-Verlag.

Rill, G., & Schaeffer, T. (2010). *Grundlagen und Methodik der Mehrkörpersimulation.* Wiebaden: Vieweg + Teubner Verlag.

Rodriguez Flick, D. (2010). *Virtuelle Absicherung manueller Fahrzeugmontagevorgänge mittels digitalem 3D-Menschmodell - Optimierung der Mensch-Maschine-Interaktion. Dissertation.* München: Technische Universität München.

Rohmert, W. (1972). Aufgaben und Inhalt der Arbeitswissenschaft. In *Die berufsbildende Schule* (S. 3-14).

Rohmert, W. (1984). Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 38*, S. 193-200.

Roth, K., & Willimczik, K. (1999). *Bewegungswissenschaft.* Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag.

Sabbah, O., Bubb, H., & Bengler, K. (2010). Übersicht zur Modellierung menschlicher Bewegungen am Beispiel des Ein- und Ausstiegs bei Automobilen. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 02/2010*, S. 89-100.

Sämann, W. (1970). *Charakteristische Merkmale und Auswirkungen ungünstiger Körperhaltungen.* Berlin: Beuth.

SantosHuman. (2012). Abgerufen am 19. Mai 2012 von http://www.santoshumaninc.com/industries/defense/

Saziorski, W. M., Aruin, A. S., & Selujanow, W. N. (1984). *Biomechanik des menschlichen Bewegungsapparates.* Berlin: Sportverlag.

Schaub, K. (2004). Das "Automotive Assembly Worksheet" (AAWS). In K. (. Landau, *Montageprozesse gestalten - Fallbeispiele aus Ergonomie und Organisation* (S. 91-111). Stuttgart: ergonomia.

Schaub, K., & Ghezel-Ahmadi, K. (2007). Vom AAWS zum EAWS – ein erweitertes Screening-Verfahren für körperliche Belastungen. In *Bericht zum 53. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 28.2.-2.3.2007 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg* (S. 601-604). Dortmund: GfA-Press.

Schaub, K., & Landau, K. (2004). Ergonomie und Prävention in der betrieblichen Praxis. *Angewandte Arbeitswissenschaft, 180*, S. 52-70.

Schaub, K., & Winter, G. (2002). Design - Check: ein Screeningverfahren zur Beurteilung körperlicher Belastungen. *Der Orthopäde, 31*, S. 987-996.

Schaub, K., Britzke, B., Sanzenbacher, G., Jasker, K., & Landau, K. (2004). Ergonomische Risikoanalysen mit MTM-Ergo. In K. (. Landau, *Montageprozesse gestalten: Fallbeispiele aus ergonomie und Organisation* (S. 175-199). Stuttgart: ergonomia.

Schaub, K., Caragnano, G., Britzke, B., & Bruder, R. (2012). The European Assembly Worksheet. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, S. 1-23.

Schaub, K., Spelten, C., & Helbig, R. (2007). IAD-BkA - Bogen zur Bewertung körperlicher Arbeit. In A. Röhrig, I. Froböse, & M. Bohnes, *Assessmentinstrumente zur Teilhabeeinschätzung. ipqr Forschungsbericht* (S. 78-79). Köln: Institut für Qualitätssicherung in Prävention und Rehabilitation GmbH an der Deutschen Sporthochschule Köln.

Schaub, K., Storz, W., & Landau, K. (2001). Nachhaltige Risikobeurteilung von Montageprozessen in der Automobilindustrie. In K. Landau, & H. (. Luczak, *Ergonomie und Organisation in der Montage.* München: Carl Hanser.

Scheer, A.-W. (1987). *CIM - Der computergesteuerte Industriebetrieb.* Berlin: Springer.

Schenk, M., & Wirth, S. (2004). *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb - Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik.* Berlin: Springer.

Scherf, C., Leitner-Mai, B., Börner, K., & Spanner-Ulmer, B. (2010). Versuchsdesign zur Generierung altersdifferenzierter Beanspruchungsprofile. In E. Müller, & B. (. Spanner-Ulmer, *Nachhaltigkeit in Planung und Produktion. 4 Symposium Wissenschaft und Praxis & 8. Fachtagung Vernetzt planen und produzieren - VPP2010* (S. 1-12). Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme.

Schlick, C., Bruder, R., & Luczak, H. (2010). *Arbeitswissenschaft.* Berlin: Springer.

Schlögl, W. (2007). Einsatz der Digitalen Fabrik von der Anlagenplanung bis in den laufenden Betrieb. In V. D. VDI, *GMA-Kongress 2007 - Automation im gesamten Lebenszyklus* (S. 717-725).

Schmidtke, H. (1993). *Ergonomie.* München: Hanser.

Schneider, M. (2008). *Logistikplanung in der Automobilindustrie - Konzeption eines Instruments zur Unterstützung der taktischen Logistikplanung vor "Start-of-Production" im Rahmen der Digitalen Fabrik.* Wiesbaden: Gabler.

Schönherr, R., Fritzsche, L., & Schmickartz, S. (2013). Praxis digitaler Arbeitsplanung – Validierungsstudie zum Einsatz des Editors menschlicher Arbeit (ema). In *Chancen durch Arbeits-, Produkt- und Systemgestaltung - Zukunftsfähigkeit für Produktions- und Dienstleistungsunternehmen* (S. 339-342). Dortmund: GfA-Press.

Schramm, D., Hiller, M., & Bardini, R. (2010). *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen.* Heidelberg: Springer.

Schuh, G., Stölzle, w., & Straube, F. (2008). *Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen - Ein Leitfaden für die Praxis.* Berlin: Springer.

Schultetus, W. (1980). *Montagegestaltung : Daten, Hinweise und Beispiele ergonomischer Arbeitsgestaltung.* Köln: Verlag TÜV Rheinland.

Seidl, A. (1994). *Das Menschmodell RAMSIS. Analyse, Synthese und Simulation dreidimensionaler Körperhaltungen des Menschen. Dissertation.* München: Technische Universität München.

Seitz, T., Marcos, P., Rodriguez Flick, D., Vereczkei, A., Wichert, A., Bubb, H., & Feussner, H. (2004). Ansätze zur Analyse und Verbesserung eines Operationsarbeitsplatzes in der minimal-invasiven Chirurgie. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 3/2004*, S. 227-231.

Sendler, U. (2009). *Das PLM-Kompendium. Referenzbuch des Produkt-Lebenszyklus-Managements.* Berlin: Springer.

Shewhart, W. A. (1939). *Statistical Method from the Viewpoint of Quality Control.* The Graduate School, Department of Agriculture.

Siemens PLM. (2012). Abgerufen am 3. April 2012 von http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/tecnomatix/assembly_planning/jack/

Simonidis, C. A. (2010). *Methoden zur Analyse und Synthese menschlicher Bewegungen unter Anwendung von Merhkörpersystemen und Optimierungsverfahren. Dissertation.* Karlsruhe: Universität Karlsruhe.

Spanner-Ulmer, B. (2006). Welchen Beitrag leistet die Ergonomie zum Gesundheitsmanagement? In T. Kohstall, *Gesundheit im Total Management* (S. 72-83). Wiesbaden: Universum-Verlag.

Spanner-Ulmer, B. (2009). Industrial Engineering - ein interdisziplinärer Ansatz. In B. Spanner-Ulmer, E. Müller, & H. (. Fischer, *3. Symposium Wissenschaft und Praxis. Industrial Engineering - Worthülse oder Erfolgsrezept.* Chemnitz: Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme.

Spanner-Ulmer, B., & Hensel, R. (2010). Die MTM-Normleistung - die Konstante unter den Variablen. In B. Britzke, *MTM in einer globalisierten Wirtschaft* (S. 43-64). München: mi-Wirtschaftsbuch, FinanzBuch Verlag.

Spanner-Ulmer, B., & Mühlstedt, J. (2009). Virtuelle Ergonomie mittels digitaler Menschmodelle und anderer Softwarewerkzeuge. In M. Schenk, *22. HAB Forschungsseminar* (S. 151-174). Berlin: GITO-Verlag.

Spanner-Ulmer, B., & Mühlstedt, J. (2010). Digitale Menschmodelle als Werkzeuge virtueller Ergonomie. Ergebnisse einer empirischen Studie. *Industrie Management - Zeitschrift für industrielle Geschäftsprozesse, 4/2010*, S. 69-72.

Spanner-Ulmer, B., Scherf, C., & Sjuts, R. (2010). Alterssimulationsanzug MAX: Anwednungsfelder und empirische Ergebnisse. In G. f. (Hrsg.), *Mensch- und prozessorientierte Arbeitsgestaltung im Fahrzeugbau. Herbstkonferenz 2010 der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, 23.-24. September 2010* (S. 165-178). Dortmund: GfA-Press.

Spur, G., & Stöferle, T. (1994). *Handbuch der Fertigungstechnik, Band 6: Fabrikbetrieb.* München: Carl Hanser Verlag.

Statistische Ämter des Bundes und der Länder. (2011). *Bevölkerungs- und Haushaltsentwicklung im Bund und in den Ländern.* Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

Steck, S., Mosig, A., Ehler, R., Hildebrand, A., & Fritzsche, L. (2008). Mixed und Virtual Reality-Methoden zur Unterstützung digitaler Ergonomieabsicherungen in der frühen Produktionsplanung. In M. (. Schenk, *Tagungsband Virtual Reality und Augmented Reality zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme. VR und AR - Automotive, 11. IFF-Wissenschaftstage, 25.-26. Juni 2008* (S. 115-123). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Stein, T. (2010). *Computational Motor Control of human Movements. Dissertation.* Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

Stein, T., Fischer, A., Boesnach, I., Gehrig, D., Köhler, H., & Schwameder, H. (2008). Kinematische Analyse menschlicher Alltagsbewegungen für die Mensch-Maschine-Interaktion. In J. Edelmann-Nusser, E. F. Moritz, V. Senner, & K. Witte, *Sporttechnologie zwischen Theorie und Praxis* (S. 49-58). Aachen: Shaker-Verlag.

Steinberg, U., & Windberg, H.-J. (1994). *Leitfaden Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der manuellen Handhabung von Lasten.* Bremerhaven: Verlag für neue Wissenschaft.

Steinhorst, U. (2005). *Entwicklung eines Instrumentariums zur Gestaltung von Systempartnerschaften im Produktentstehungsprozess.* Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.

Stelzner, G. (2008). *Zur Modellierung und Simulation biomechanischer Mehrkörpersysteme.* Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.

Streb, C., Voelpel, S., & Leibold, M. (2008). Aging Workforce Management in the Automobile Industry: Defining the Concept and its Constituting Elements. *Zeitschrift für Personalforschung, 23*, S. 8-27.

Sturman, D. J. (1994). A Brief History of Motion Capture for Computer Character Animation. In *SIGGRAPH 94, Course 9.*

Thiele, A. (2011). *Analyse und technologische Strukturierung von Bewegungsdaten mit dem Ziel der Ableitung und analytischen Formulierung von physikalisch-technischen Zusammenhängen. Masterarbeit.* Chemnitz: Technische Universität Chemnitz.

Thiemich, J. (2012). Ergonomie im Volkswagen Werk Kassel - Beispiele zur Verhaltensprävention und zur Ergonomie im Produktentstehungsprozess. In *Gestaltung nachhaltiger Arbeitssysteme. 58. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 119-122). Dortmund: GfA-Press.

Tilch, J. (2012). *Ausarbeitung eines Algorithmus zur automatisierten Werkstückhandhabung für ein Digitales Menschmodell. Bacherlorarbeit.* Chemnitz: Technische Universität Chemnitz.

Tober, H., & Köhler, T. (2009). Grundlagen und technische Realisierungskonzepte zur Stand- und Bewegungsanalyse. *Orthopädie-Technik 1/09*, S. 15-19.

Toledo Muñoz, B. (2012). Global ergonomics strategy in Volkswagen: from the product construction, over the planning until the serial process. *Work, Volume 41*, S. 4413-4417.

Uhlig, J. (2008). *Analyse, Systematisierung und Vorbereitung der Implementierung parametrischer Verrichtungen zur Anwendung im Planungswerkzeug „Editor menschlicher Arbeit". Diplomarbeit.* Chemnitz: Technische Universität Chemnitz.

Ulich, E. (2011). *Arbeitspsychologie.* Stuttgart: Schäffer-Poeschel-Verlag.

Unger, K., & Jander, H. (2010). Berücksichtigung der Ergonomie im Produktentstehungsprozess als ein Mittel zur Beherrschung des Demografischen Wandels. In *Mensch- und prozessorientierte Arbeitsgestaltung im Fahrzeugbau: Herbstkonferenz 2010 der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 69-74). Dortmund: GfA-Press.

Verein Deutscher Ingenieure VDI. (1990). *VDI-Richtlinie 2860. Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole.* Berlin: Beuth.

Verein Deutscher Ingenieure VDI. (2001). *VDI-Richtlinie 3633. Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Blatt 6: Abbildung des Personals in Simulationsmodellen.* Berlin: Beuth.

Verein Deutscher Ingenieure VDI. (2008). *VDI-Richtlinie 4499. Digitale Fabrik Grundlagen.* Berlin: Beuth.

Voigt, K.-I. (2008). *Industrielles Management - Industriebetriebslehre aus prozessorientierter Sicht.* Berlin: Springer.

Wakula, J., Berg, K., Schaub, K., Bruder, R., Glitsch, U., & Ellegast, R. (2009). *Der montagespezifische Kraftatlas.* Berlin: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV).

Waters, T. R., Putz-Anderson, V., & Garg, A. (1994). *Applications Manual For the Revised NIOSH Lifting Equation.* Cincinnati: U. S. Department of Health and Human Ser.

Waters, T. R., Putz-Anderson, V., Garg, A., & Fine, L. J. (1993). Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. *Ergonomics, Volume 36*, S. 749-776.

Weber, B. (2010). *Entwicklung und Evaluation eines Bewegungsmesssystems zur Analyse der physischen Aktivität. Dissertation.* Deutsche Sporthochschule Köln.

Weber, W., & Weber, E. (1836). *Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge - eine anatomisch-physiologische Untersuchung.* Göttingen: Dieterichsche Buchhandlung.

Westkämper, E. (2006). *Einführung in die Organisation der Produktion.* Berlin: Springer.

Westkämper, E., & Zahn, E. (2009). *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen - Das Stuttgarter Unternehmensmodell.* Berlin: Springer.

Wiendahl, H.-P., Reichardt, J., & Nyhuis, P. (2009). *Handbuch Fabrikplanung - Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten.* München: Carl Hanser Verlag.

Willimczik, K., & Roth, K. (1983). *Bewegungslehre.* Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag.

Wirth, D., & Liphardt, M. (1999). *Untersuchung der Händigkeit. Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin (DGAUM).* Dresden: Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin (DGAUM).

Wischniewski, S., Hold, U., & Lehmann, M. (2012). Ergonomische Analyse menschlicher Bewegungsabläufe mittels Spielkonsolen-Technologie - Aktuelle Möglichkeiten und Grenzen. In *Gestaltung nachhaltiger Arbeitssysteme. 58. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 123-126). Dortmund: GfA-Press.

Witkin, A., & Popovic, Z. (1995). Motion Warping. In *SIGGRAPH 95. COMPUTER GRAPHICS Proceedings, Annual Conference Series.* Los Angeles.

Woernle, C. (2011). *Mehrkörpersysteme.* Heidelberg: Springer.

Yeung, S., Genaidy, A., Deddens, J., Shoaf, C., & Leung, P. C. (2003). A participatory approach to the study of lifting demands and musculoskeletal symptoms among Hong Kong workers. *Occupational and Environmental Medicine, 60*, S. 730-738.

Zäh, M. F. (2006). *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien.* München: Carl Hanser Verlag.

Zalpour, C. (2006). *Für die Physiotherapie: Anatomie Physiologie.* München: Elsevier.

Zeitler, J., & Simon, G. (1998). *Physik für Techniker und technische Berufe.* Leipzig: Carl Hanser Verlag.

Zoike, E., Bungard, S., Ganske, V., Grothaus, F.-J., Hertle, D., Tewes, C., . . . Kliner, K. (2011). *BKK Gesundheitsreport 2011. Zukunft der Arbeit.* Essen: BKK Bundesverband.

Zülch, G. (2009). Perspektiven der Menschmodellierung als Werkzeug der digitalen Fabrikplanung. In M. Schenk, *22. HAB Forschungsseminar* (S. 105-124). Berlin: GITO-Verlag.

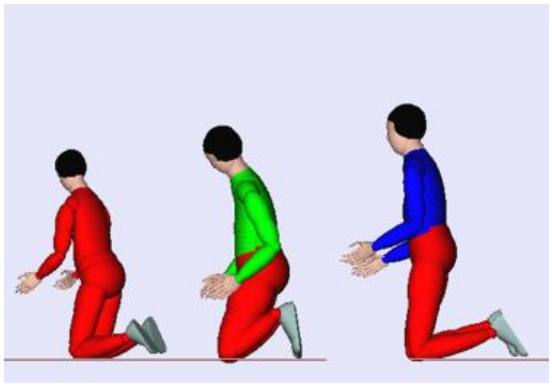
Anlagen

Anlage 1: Dokumentation zur Motion Capturing-Studie 1

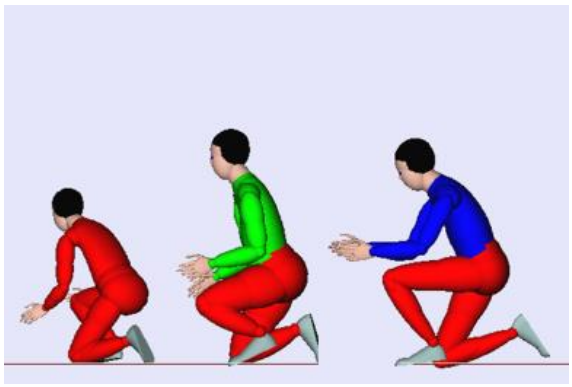
Die Ausführung der Verrichtung begann bzw. endete jeweils in der Grundhaltung „Stehen“. Während der Ausführung wählte der Proband seine Körperstellung, den Abstand zum Objekt etc. intuitiv.

Körperbewegungen

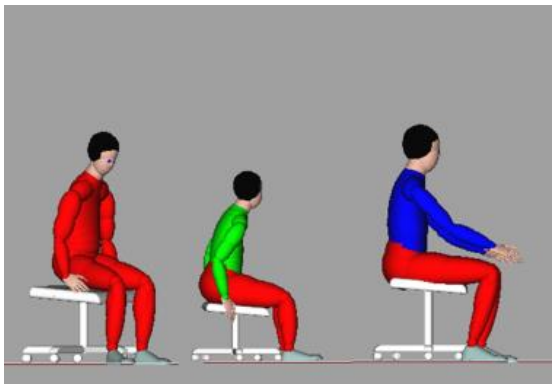
Hinknien beidseitig



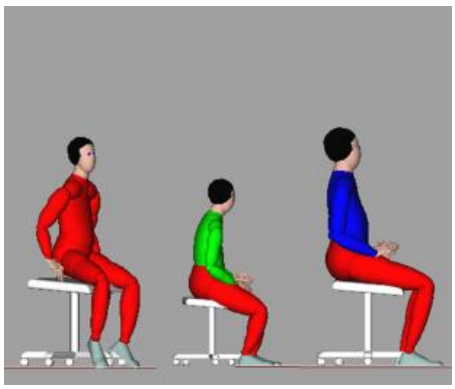
Hinknien einseitig



Hinsetzen Komforthöhe

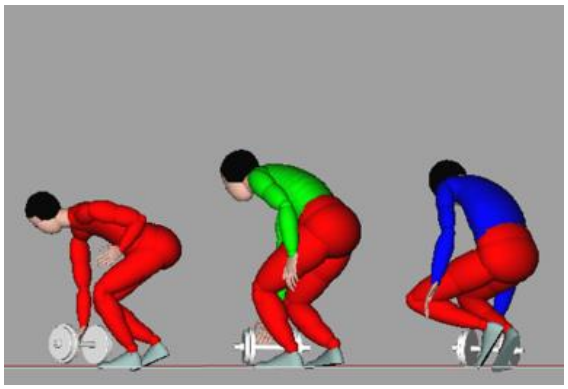


Hinsetzen Sitzhöhe 0,53m



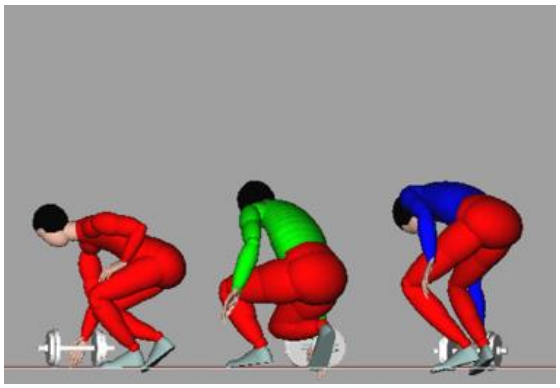
Aufnehmen und Platzieren von Objekten

Objekt aufnehmen
einhändig
Gewicht 1kg
Höhe 0m

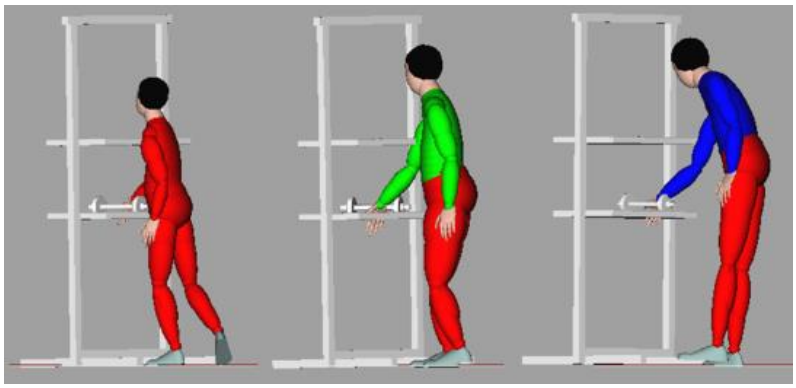


Objekt aufnehmen
einhändig
Gewicht 5kg
Höhe 0m

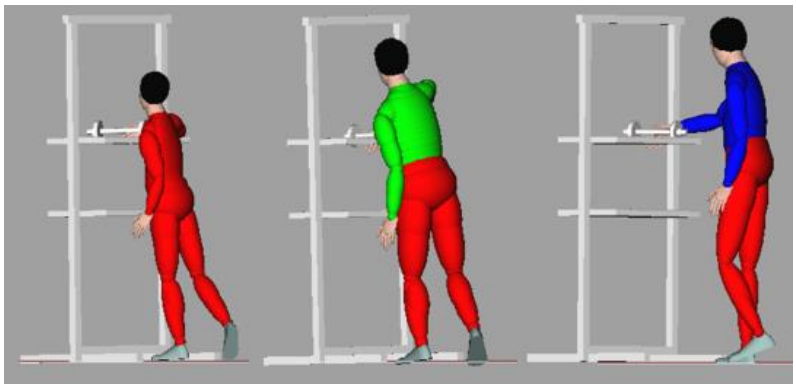
Objekt aufnehmen
einhändig
Gewicht 7,5kg
Höhe 0m



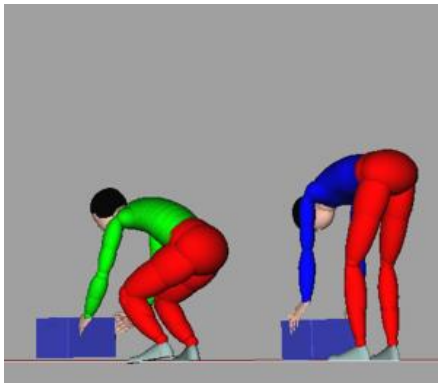
Objekt aufnehmen
einhändig
Gewicht 5kg
Höhe 0,8m



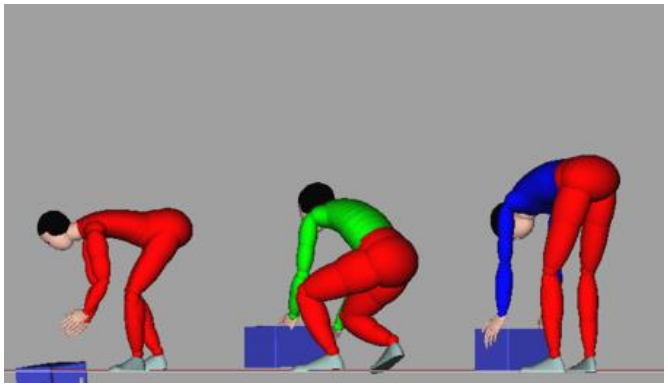
Objekt aufnehmen
einhändig
Gewicht 5kg
Höhe 0,8m



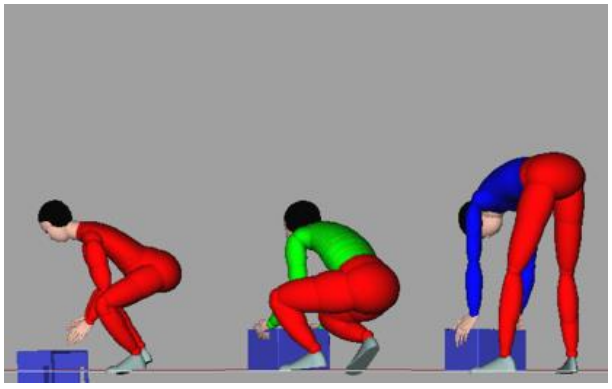
Objekt aufnehmen
beidhändig
Gewicht 1kg
Höhe 0m



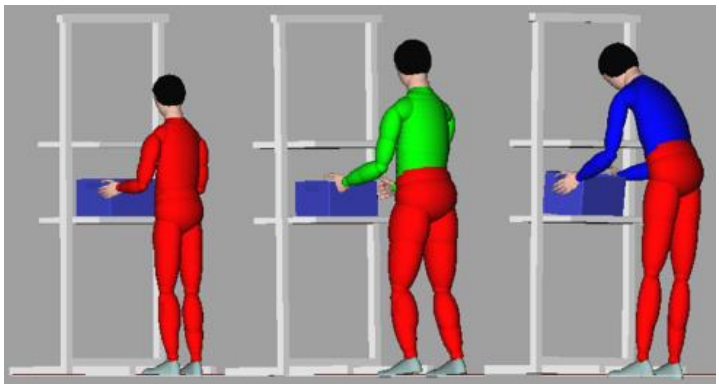
Objekt aufnehmen
beidhändig
Gewicht 8kg
Höhe 0m



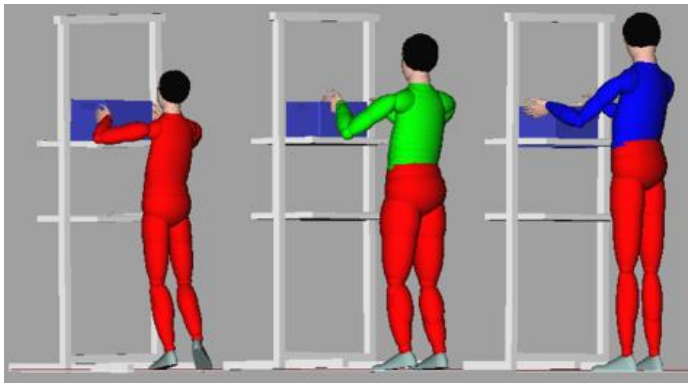
Objekt aufnehmen
beidhändig
Gewicht 15kg
Höhe 0m



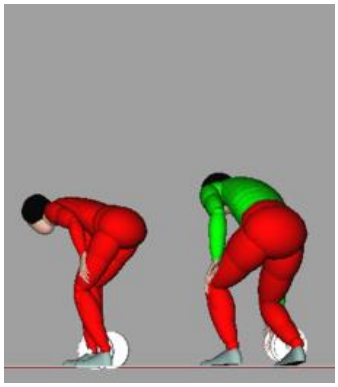
Objekt aufnehmen
beidhändig
Gewicht 8kg
Höhe 0,8m



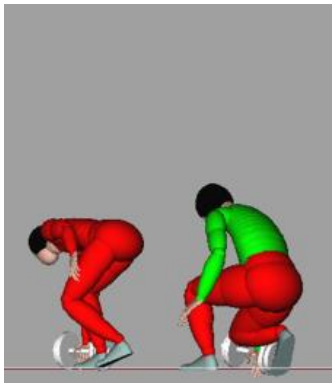
Objekt aufnehmen
beidhändig
Gewicht 8kg
Höhe 1,2m



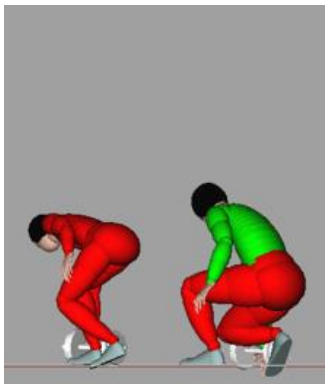
Objekt platzieren
einhändig
Gewicht 1kg
Höhe 0m



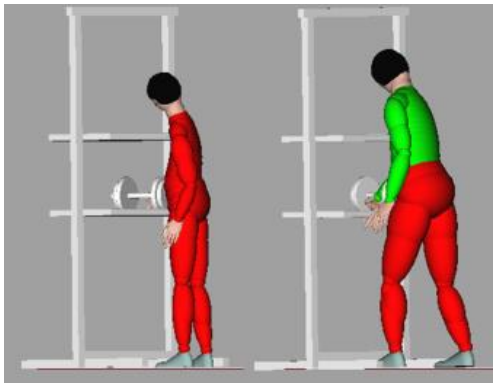
Objekt platzieren
einhändig
Gewicht 5kg
Höhe 0m



Objekt platzieren
einhändig
Gewicht 7,5kg
Höhe 0m

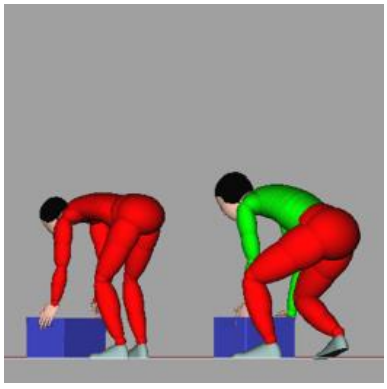


Objekt platzieren
einhändig
Gewicht 5kg
Höhe 0,8m

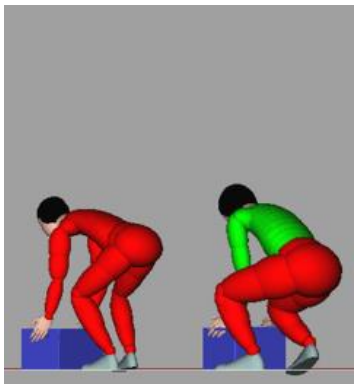


Objekt platzieren
einhändig
Gewicht 5kg
Höhe 1,2m

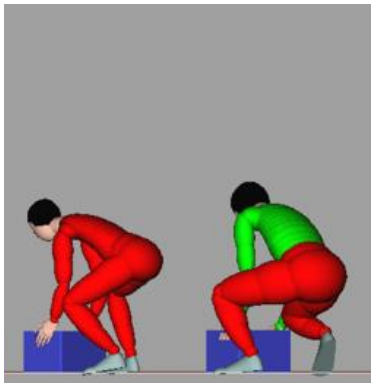
Objekt platzieren
beidhändig
Gewicht 1kg
Höhe 0m



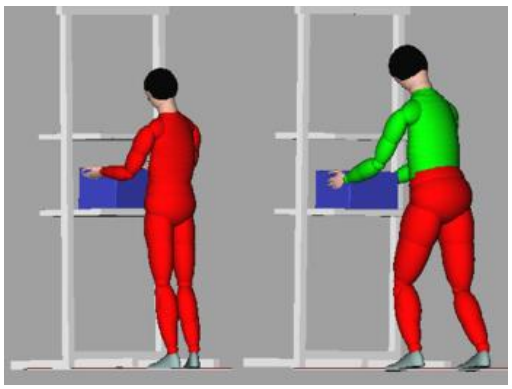
Objekt platzieren
beidhändig
Gewicht 8kg
Höhe 0m



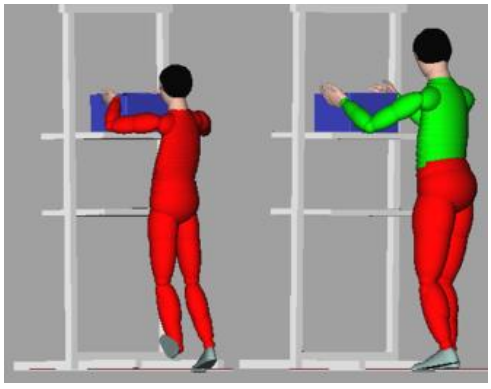
Objekt platzieren
beidhändig
Gewicht 15kg
Höhe 0m



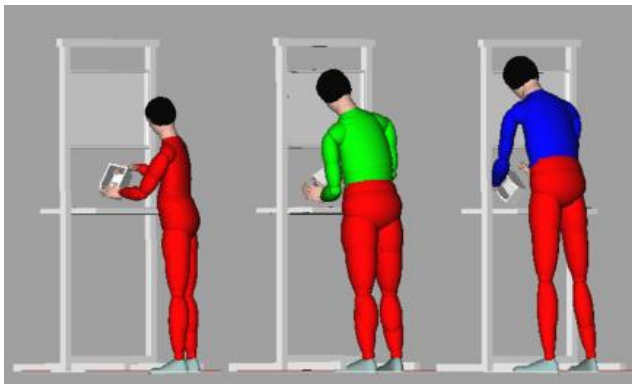
Objekt platzieren
beidhändig
Gewicht 8kg
Höhe 0,8m



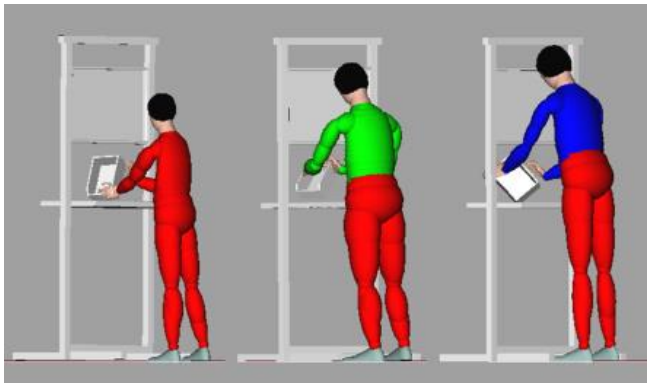
Objekt platzieren
beidhändig
Gewicht 8kg
Höhe 1,2m



Medium umschütten
Gewicht 0,5kg
Höhe 0,9m

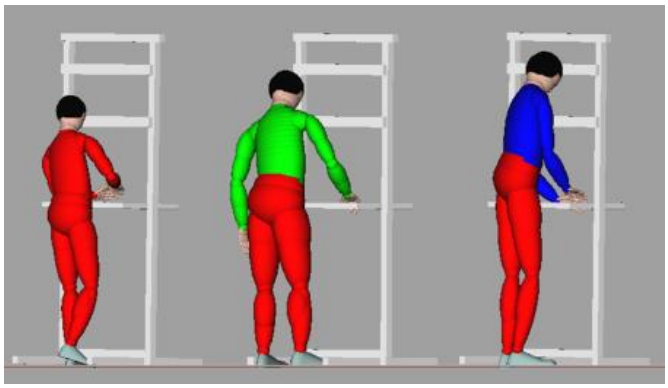


Medium umschütten
Gewicht 1kg
Höhe 0,9m

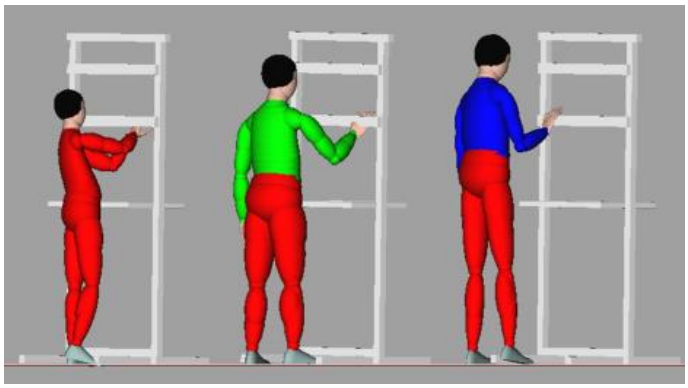


Werkstückhandhabung

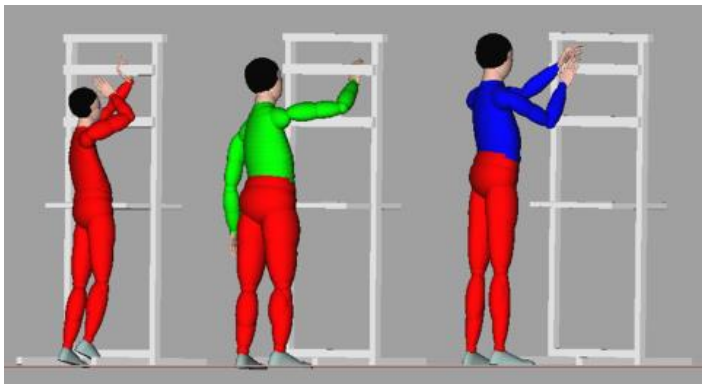
Schrauben heften
horizontal
Höhe 0,9m



Schrauben heften
vertikal
Höhe 1,4m



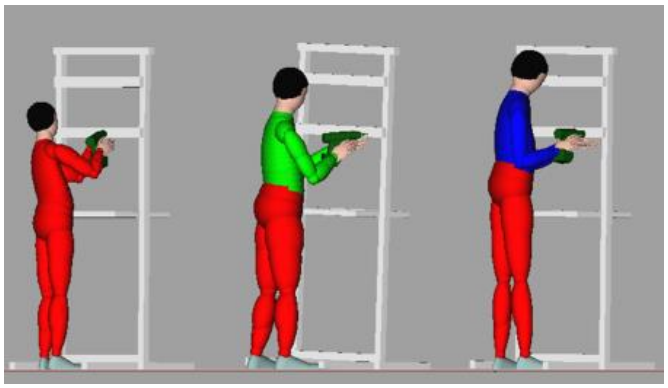
Schrauben heften
vertikal
Höhe 1,7m



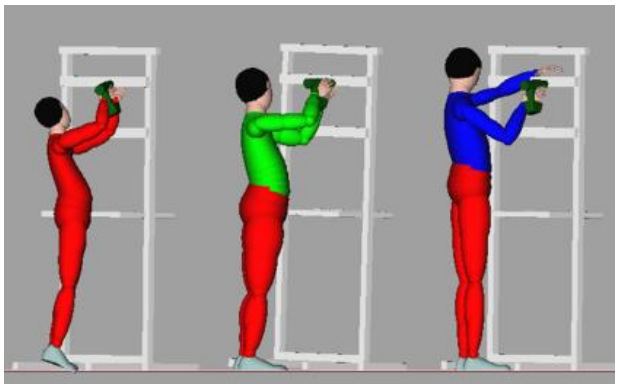
Werkzeughandhabung

Handhabung
Akkuschrauber mit
Pistolengriff
horizontal
Höhe 0,9m

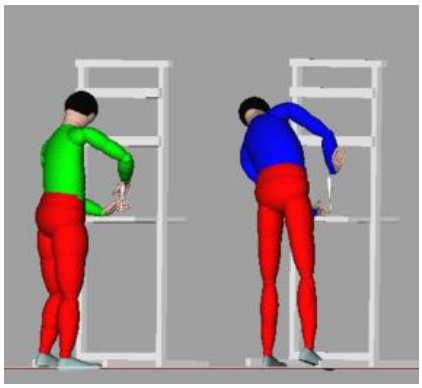
Handhabung
Akkuschrauber mit
Pistolengriff
vertikal
Höhe 1,4m



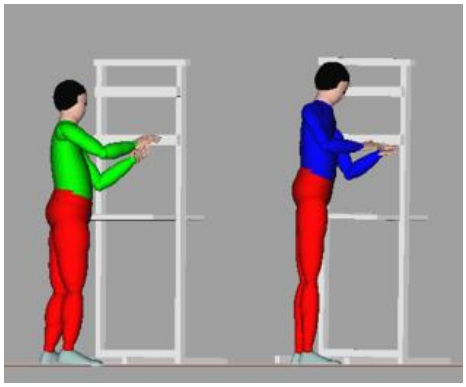
Handhabung
Akkuschrauber mit
Pistolengriff
vertikal
Höhe 1,7m



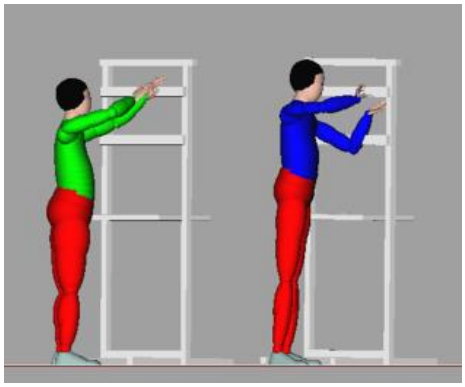
Handhabung
Schraubendreher
horizontal
Höhe 0,9m



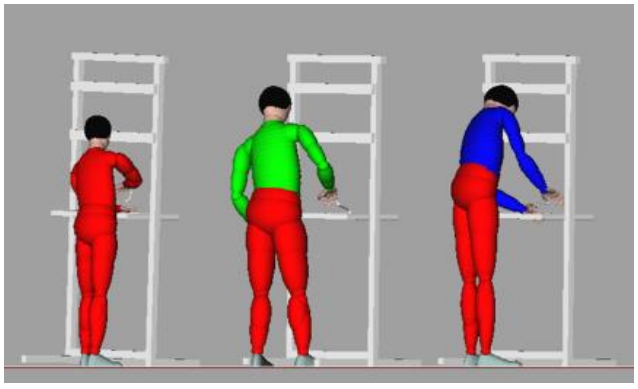
Handhabung
Schraubendreher
vertikal
Höhe 1,4m



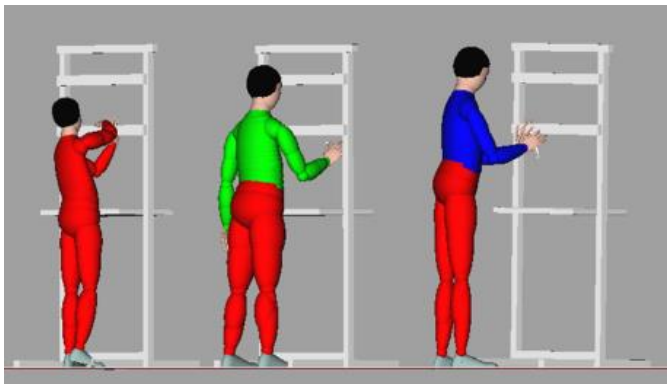
Handhabung
Schraubendreher
vertikal
Höhe 1,7m



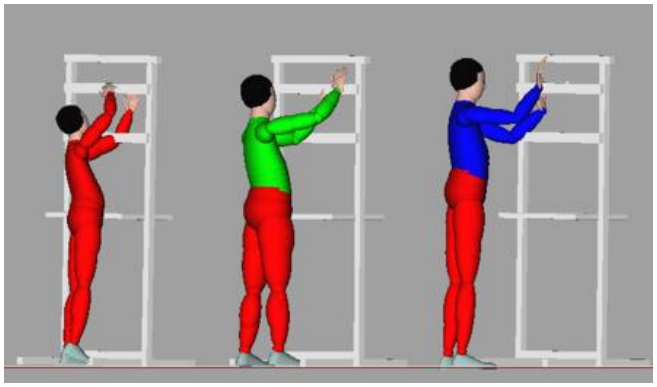
Handhabung
Schraubenschlüssel
horizontal
Höhe 0,9m



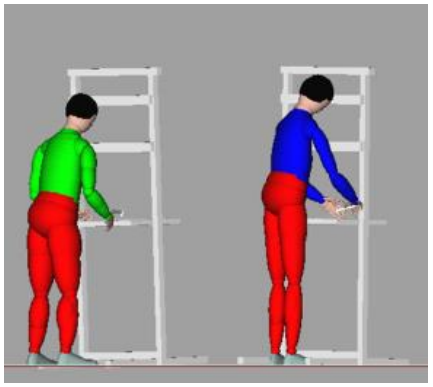
Handhabung
Schraubenschlüssel
vertikal
Höhe 1,4m



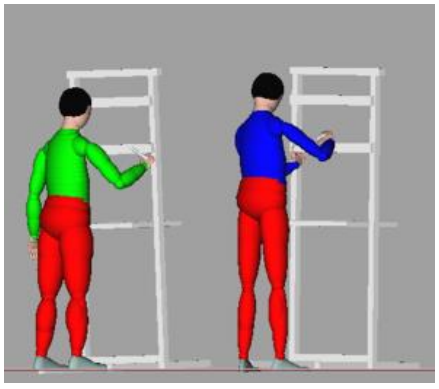
Handhabung
Schraubenschlüssel
vertikal
Höhe 1,7m



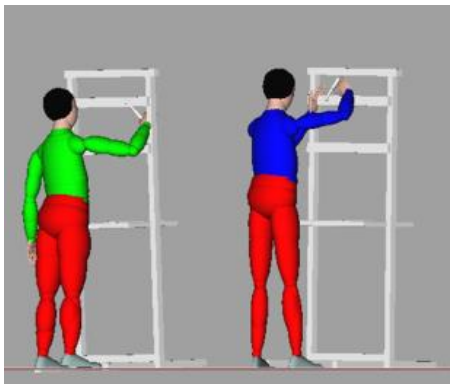
Handhabung
Drehmomentschlüssel
horizontal
Höhe 0,9m



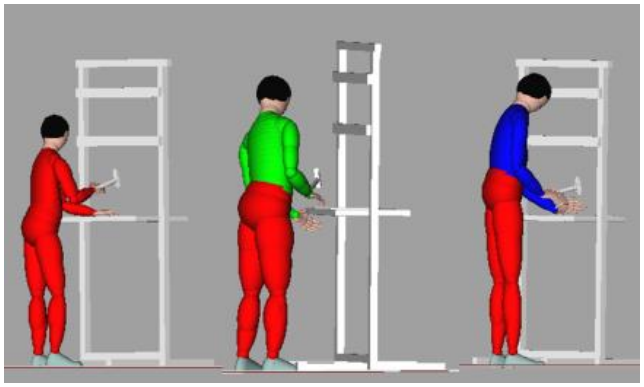
Handhabung
Drehmomentschlüssel
vertikal
Höhe 1,4m



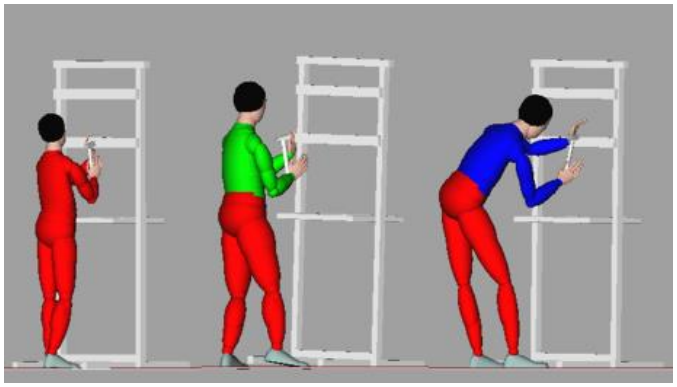
Handhabung
Drehmomentschlüssel
vertikal
Höhe 1,7m



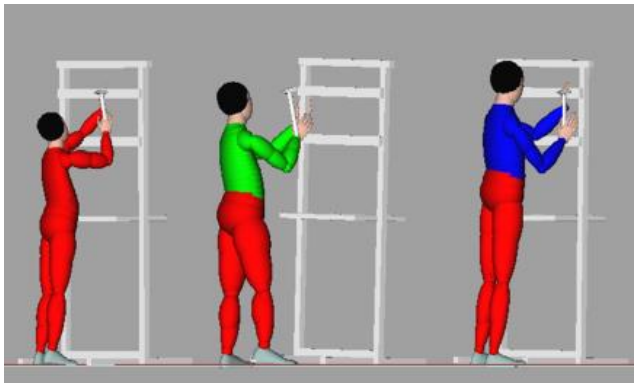
Handhabung Hammer
horizontal
Höhe 0,9m



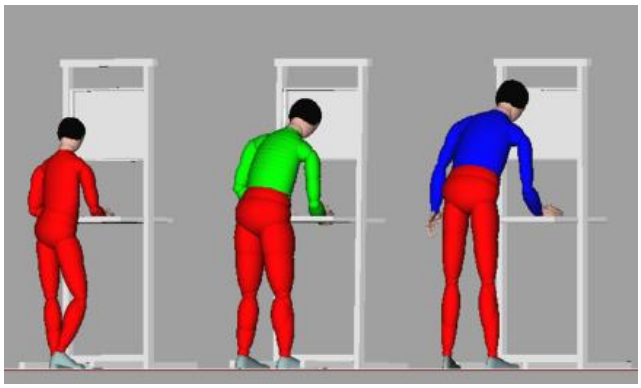
Handhabung Hammer
vertikal
Höhe 1,4m



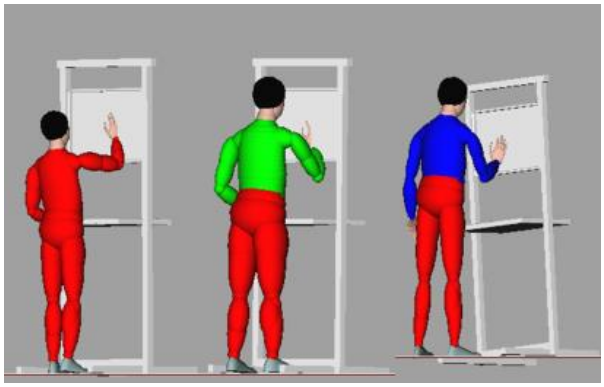
Handhabung Hammer
vertikal
Höhe 1,7m



Schreiben mit Stift
horizontal
Höhe 0,9m

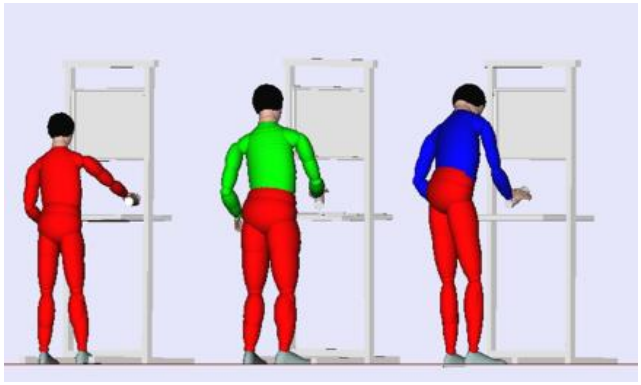


Schreiben mit Stift
vertikal
Höhe 1,5m

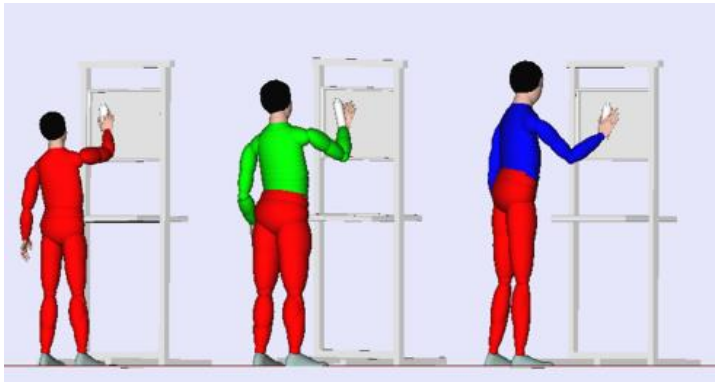


Medium auftragen

Medium mit Sprühdose auf Fläche auftragen
horizontal
Höhe 0,9m

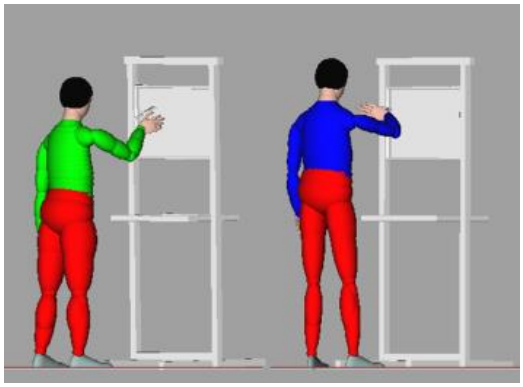


Medium mit Sprühdose auf Fläche auftragen
vertikal
Höhe 1,5m

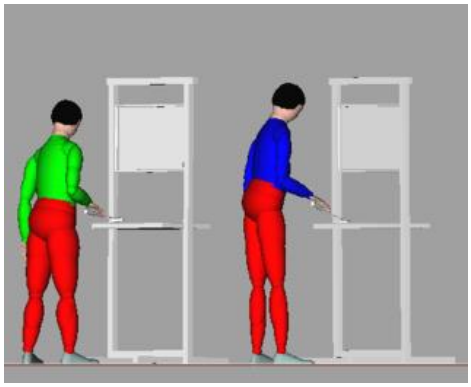


Medium mit Pinsel auf Fläche auftragen
horizontal
Höhe 0,9m

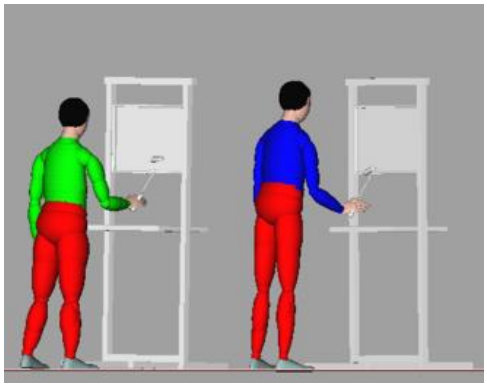
Medium mit Pinsel auf Fläche auftragen
vertikal
Höhe 1,5m



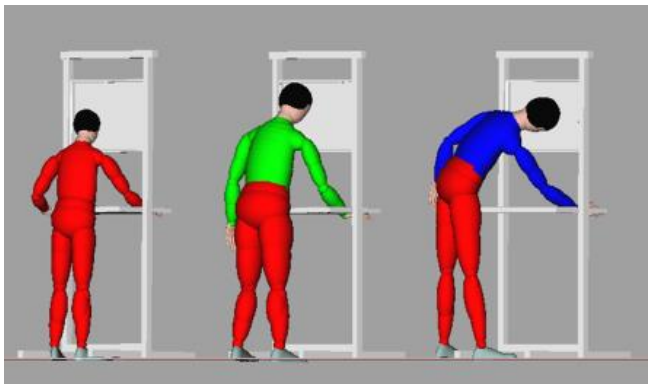
Medium mit Rolle auf Fläche auftragen
horizontal
Höhe 0,9m



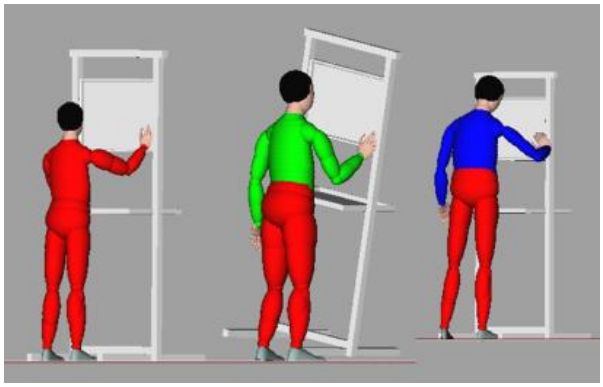
Medium mit Rolle auf Fläche auftragen
vertikal
Höhe 1,5m



Medium mit Lappen auf Fläche auftragen
horizontal
Höhe 0,9m



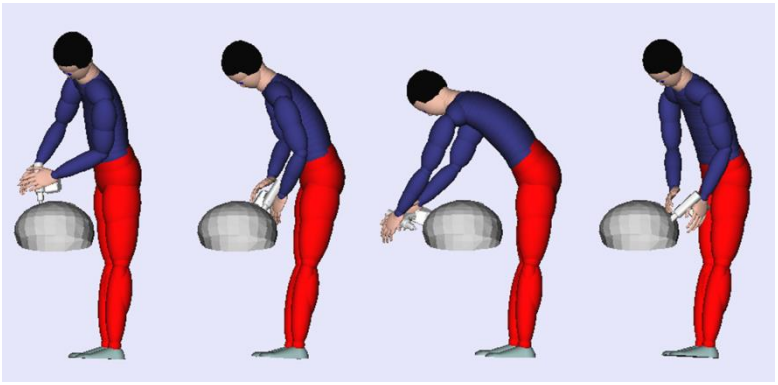
Medium mit Lappen auf Fläche auftragen
vertikal
Höhe 1,5m



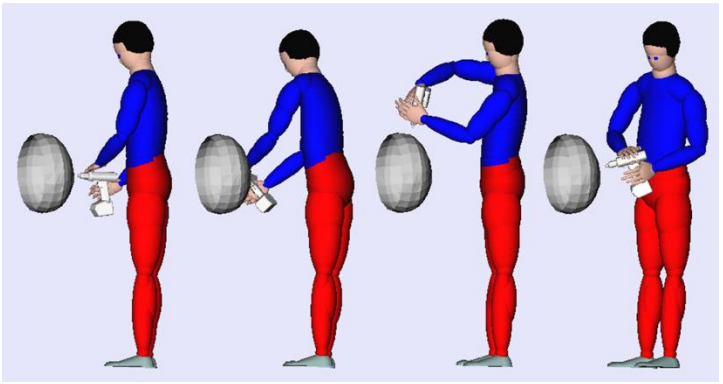
Anlage 2: Dokumentation zur Motion Capturing-Studie 2

Handhaben Akkuschrauber mit Pistolengriff

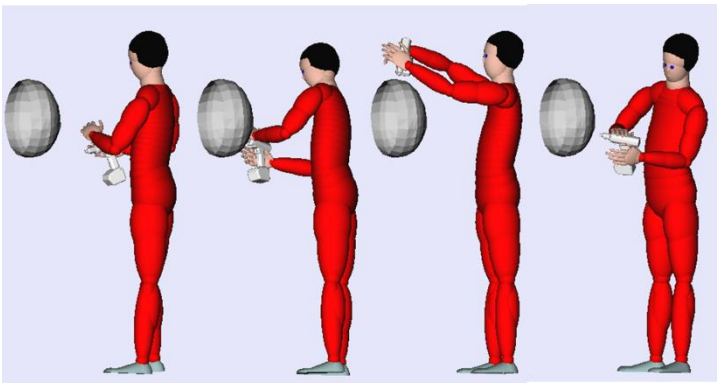
horizontal
Kniehöhe



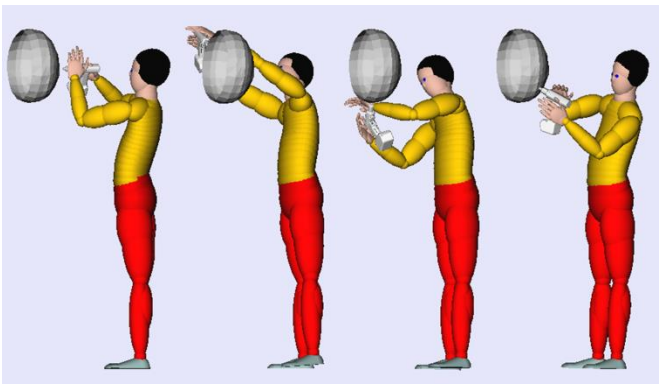
vertikal
Hüfthöhe



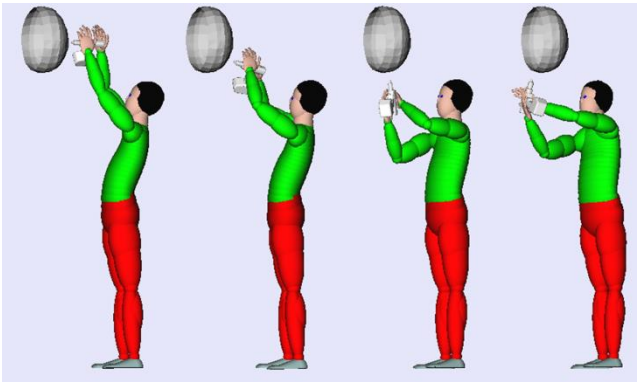
vertikal
Brusthöhe



vertikal
Augenhöhe

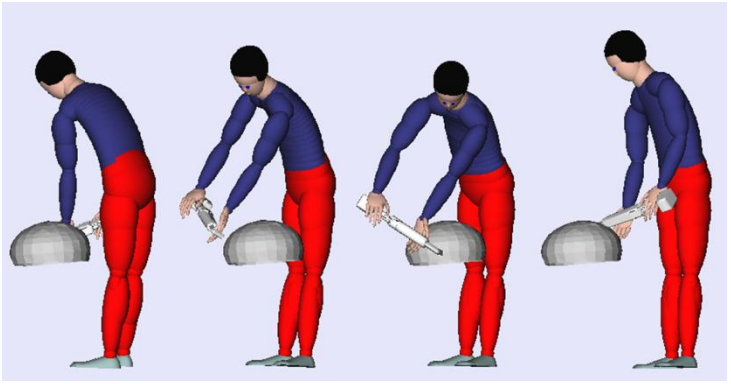


vertikal
Überkopfhöhe

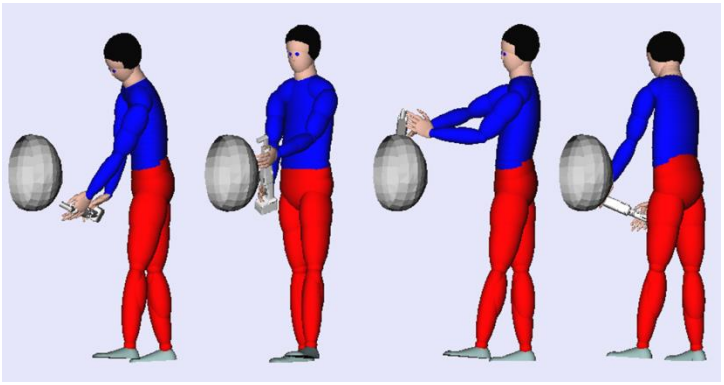


Handhaben Akkuschrauber mit Zylindergriff

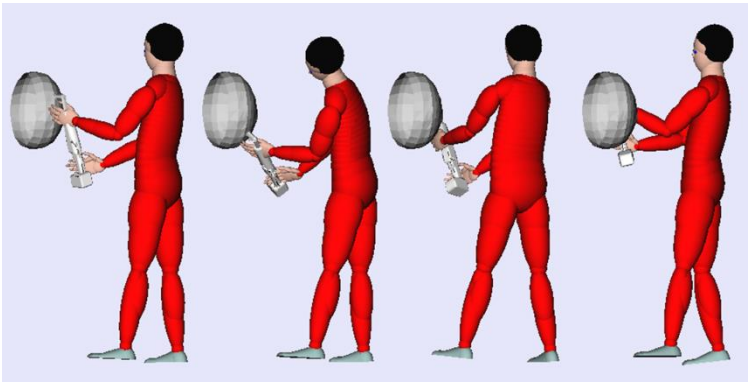
horizontal
Kniehöhe



vertikal
Hüfthöhe

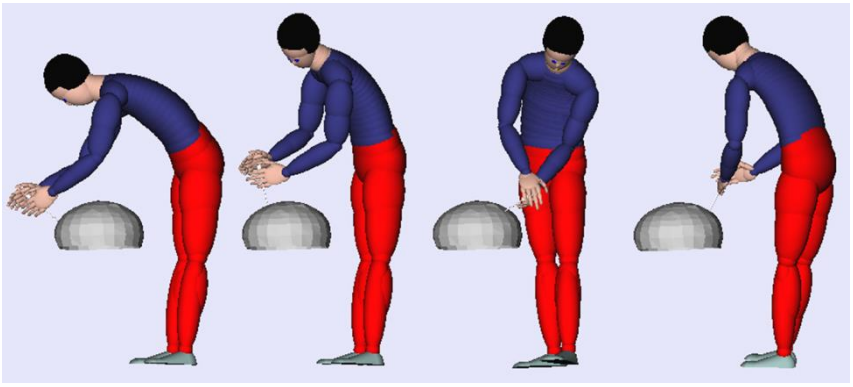


vertikal
Brusthöhe

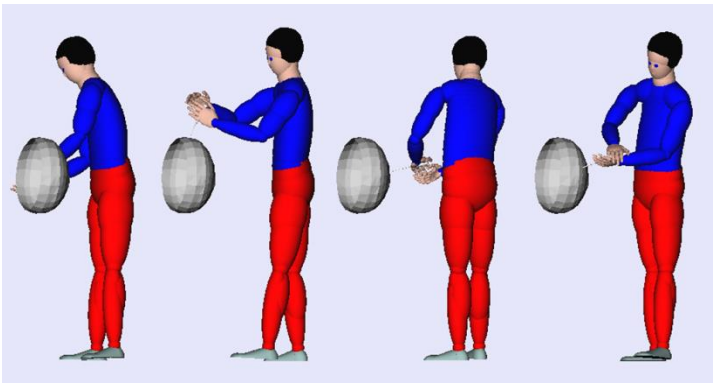


Handhaben Eindrückwerkzeug mit Zylindergriff

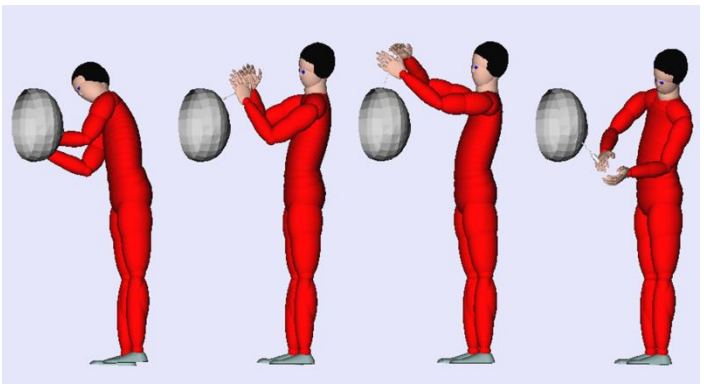
horizontal
Kniehöhe



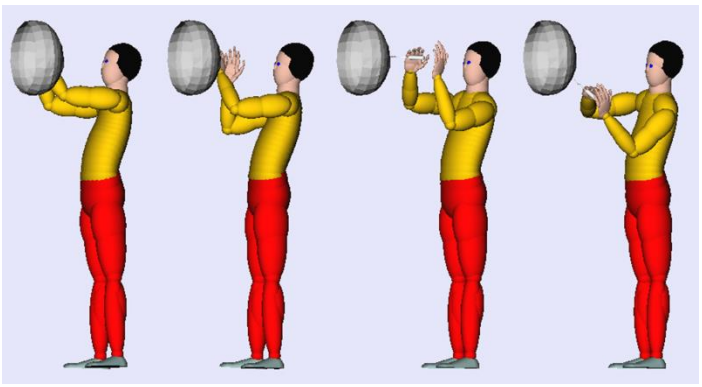
vertikal
Hüfthöhe



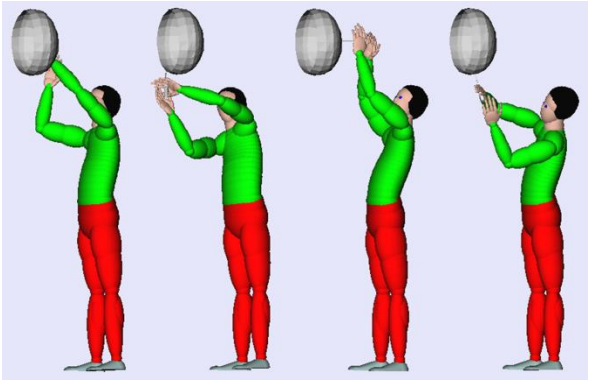
vertikal
Brusthöhe



vertikal
Augenhöhe

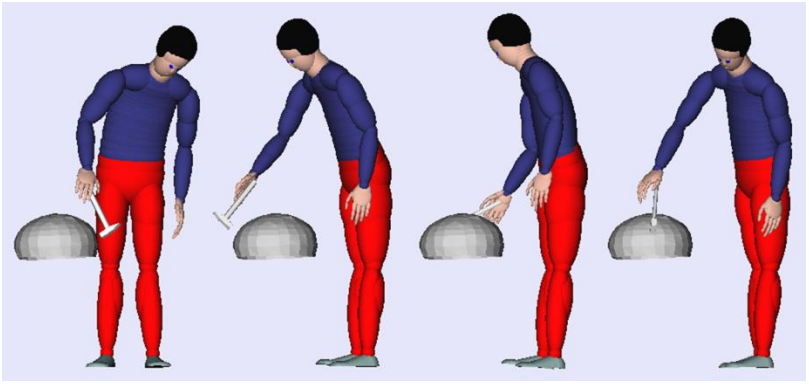


vertikal
Überkopfhöhe

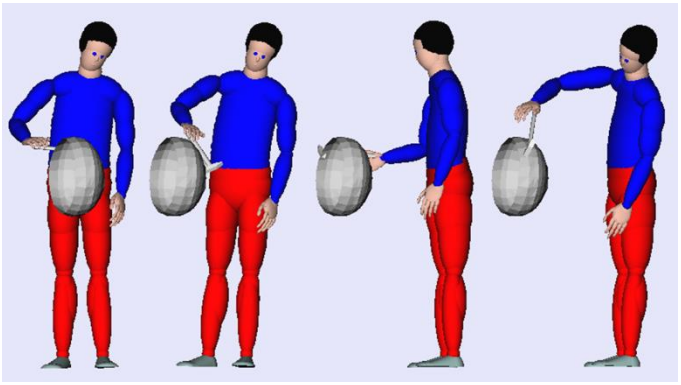


Handhaben Hammer

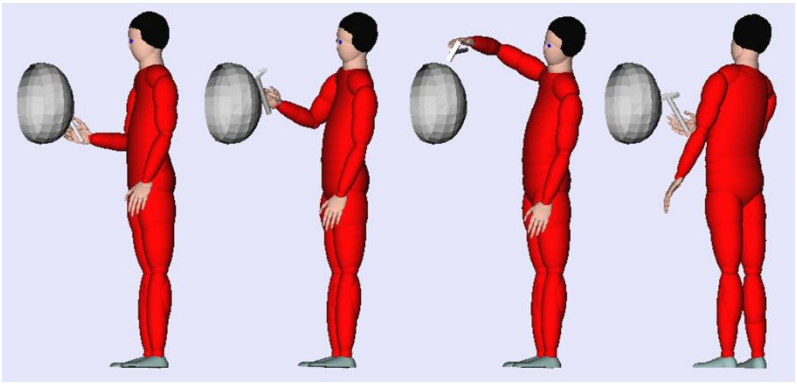
horizontal
Kniehöhe



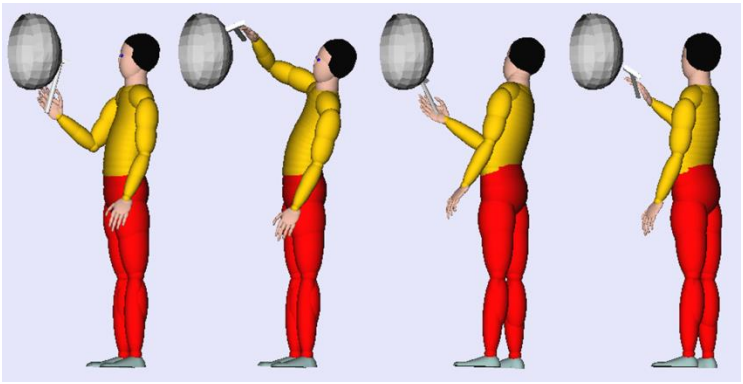
vertikal
Hüfthöhe



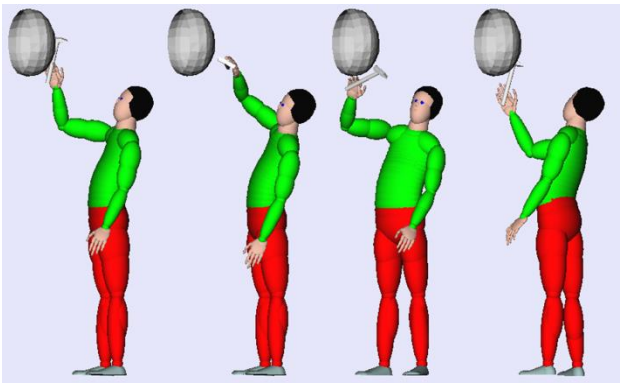
vertikal
Brusthöhe



vertikal
Augenhöhe

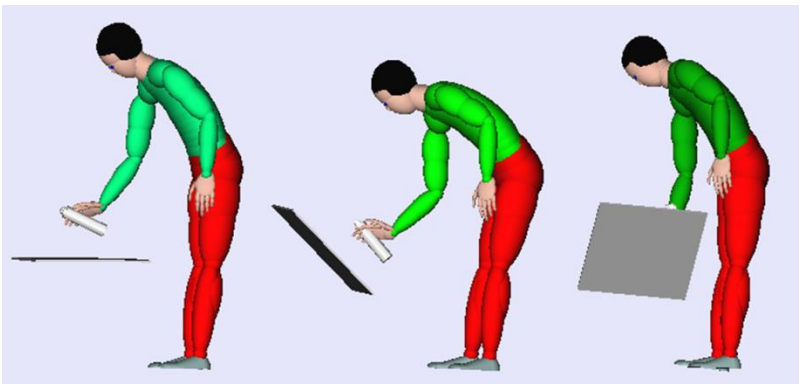


vertikal
Überkopfhöhe

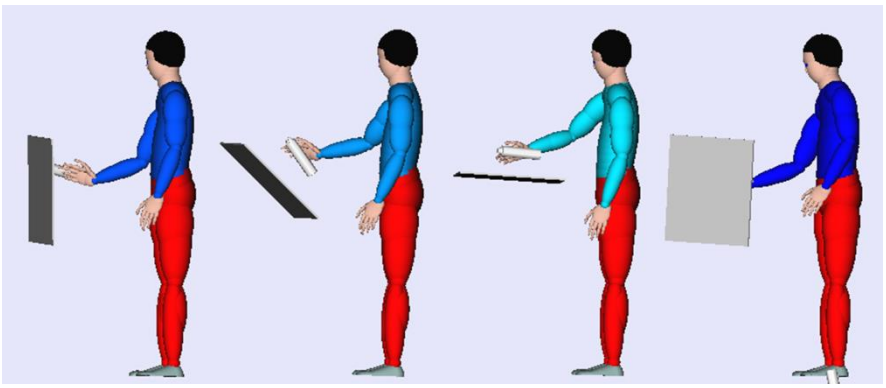


Medium mit Sprühdose auf Fläche auftragen

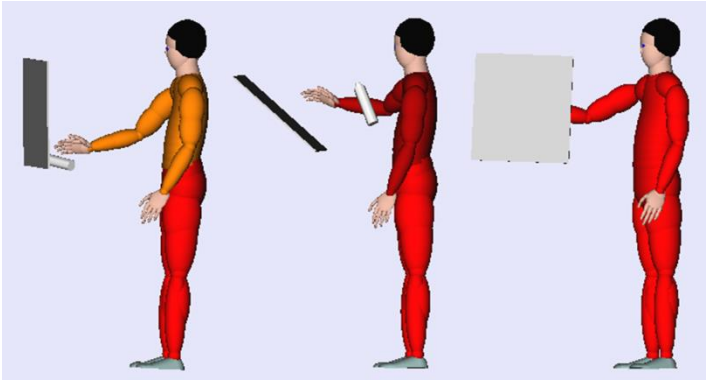
Kniehöhe



Hüfthöhe



Brusthöhe



Anlage 3: Software „Ergo-Tool“

Die Nachbildung der erfassten menschlichen Bewegungen erfolgt mit Hilfe des Menschmodells Dynamicus, einem AddOn zum Simulationswerkzeug alaska, welches am Institut für Mechatronik entwickelt wurde. Dynamicus bildet den menschlichen Körper durch 21 Segmentkörper ab.
Zur Visualisierung und Auswertung der mittels Motion Capturing erfassten menschlichen Bewegungen diente die Software Ergo-Tool.

Eine 3D-Animation sowie die Ausgabe von Diagrammen für die Gelenkwinkel-Verläufe ermöglichen eine objektive, fundierte Analyse der Bewegung. Durch Vergleich mehrerer Bewegungen in einer Animationssequenz können verschiedene Bewegungsstrategien verglichen werden. Ergo-Tool bietet eine einfache, intuitive Bedienoberfläche. Zur Analyse können die Bewegungen aus sechs verschiedenen Kamerapositionen betrachten werden, außerdem sind ein freies Drehen der Ansicht sowie ein Anpassen der Größe möglich.

Anlage 4: Bewertungsbogen EAWS

European Assembly Worksheet (V 1.3.2c de)

Werk:	Linie:	Geschlecht des Werkers: m ☐ f ☐; Körpergröße: .....[cm]	
Task:		Analyst:	Datum:
		Taktzeit: .....[sec]	UAS-Analyse:

Gesamtergebnis der Analyse:

☐ grün ☐ gelb ☐ rot	Gesamt-körper	=	Haltung	+	Kräfte	+	manuelle Lasten-handhabung	+	Extra	Obere Extremitäten
		=		+		+		+		

EAWS Bewertung			
0 bis ≤ 25 Punkte	grün	niedriges Risiko: – empfehlenswert; Maßnahmen nicht erforderlich
> 25 bis < 50 Punkte	gelb	mögliches Risiko: – nicht empfehlenswert; Maßnahmen zur erneuten Gestaltung/ Risikobeherrschung ergreifen
≥ 50 Punkte	rot	hohes Risiko: – vermeiden; Maßnahmen zur Risikobeherrschung erforderlich

Extrapunkte "Gesamter Körper" *(pro Minute / Schicht)*			Extrapunkte
0a	Beeinträchtigung durch Arbeit an sich bewegenden Objekten	0 ..... 3 ..... 8 ..... 15 keine mittel stark sehr stark	Beeinträchtigung:
0b	Zugänglichkeit (z. B. Motor- oder Passagierbereich)	0 ..... 2 ..... 5 ..... 10 gut erschwert schlecht sehr schlecht	Zugänglichkeit:
0c	Schwingungen, Impulse, Rückschlagkräfte	0 ..... 1 ..... 2,5 ..... 4 ..... 6 ..... 8 [n] 1-2 4-5 8-10 18-20 > 20 0 ..... 1 ..... 2 ..... 5 gering sichtbar stark sehr stark	Anzahl x Intensität:
0d	Gelenkstellung (insb. Handgelenk)	0 ..... 2 ..... 2,5 ..... 4 ..... 6 ..... 8 [sec] 3 10 20 40 60 [n] 1 8 11 16 20 [%] 5 17 33 67 100 0 ..... 1 ..... 3 ..... 5 neutral ..... ~1/2 max ..... ~2/3 max ..... maximal	Dauer oder Anzahl x Intensität:
0e	Andere körperliche Belastungen (bitte beschreiben) (Bitte EAWS Einstufungsanleitung beachten)	0 ..... 5 ..... 10 ..... 15 keine gering stark sehr stark	Andere körperliche Belastungen:

extra = Σ Zeilen 0a – 0e | **Achtung:** Max. Punktzahl Zeilen 0a & 0e je 15 Pkt., Zeilen 0c & 0d je 40 Pkt. und Zeile 0b 10 Pkt.. | **Achtung:** Werte korrigieren, wenn Taktzeit ➡ 60s | =

Bemerkungen / Verbesserungsvorschläge

Berechnung Belastungsdauer (nur für Bewertung (hoch)repetitiver Tätigkeiten):

Unit	Beschreibung	Berechnung	Ergebnis
Tatsächliche Schichtdauer [min]			
Offizielle Pausen und andere Pausen [min]		-	
Tatsächliche Dauer der Mittagspause [min]		-	
Nichtrepetitive Tätigkeiten (z. B. Reinigung, Materialbeschaffung, etc.) [min]		-	
Nettodauer der repetitiven Tätigkeit/en (= a) [min]		=	
Anzahl an Einheiten (oder Takten/Zyklen)	(b)	(a/b x 60)=	
Netto-Zykluszeit [sec]			
Beobachtete Zykluszeit [sec]			
Resultierender Wert "Obere Extremitäten" (Zeile 20)			

European Assembly Worksheet (V 1.3.2c de)

Körperstellung sowie Rumpf- und Armhaltungen (inkl. Lasten / Aktionskräften von 30-40N)			(pro Minute / Schicht) Zeitdauern für statische Rumpf- und Armhaltungen [%, sec/min, min/8h]					Zeilensumme	Körperhaltung		
Für Taktzeiten ⬌ 60s. sind die Werte in den Zeilen 1-16 wie folgt zu korrigieren: Zeitdauer = (Dauer der Körperhaltung) × 60 ÷ Taktzeit [sec]			5 ....10 .....20 .....33 ..... 67 ....>67 3 .....6 .....12 .....20 ..... 40 ....>40 25 ...50 .....100 ....160 .... 320 .>320						Rumpf-drehung 1)	Rumpf-neigung 1)	Reichweite (RW) 2)
									Dauer 0-3 / Höhe 0-5 Dauer x Höhe	Dauer 0-3 / Höhe 0-5 Dauer x Höhe	Dauer 0-2 / Höhe 0-5 Dauer x Höhe
Stehen											
1		Aufrecht Stehen & Gehen, ggf. leicht nach vorne oder hinten geneigt	0	0	1	1	2				
2		Stehen, keine Abstützung (Einschränkungen zu Extrapunkten)	1	2	4	8	13				
3		nach vorn gebeugt (20-60°)	3	7	12	23	40				
		mit geeigneter Abstützung	2	5	8	15	25				
4		stark gebeugt >60°	5	12	21	38	63				
		mit geeigneter Abstützung	3	7	12	23	38				
5		aufrecht, Arme auf / über Schulterhöhe	5	12	21	38	63				
6		aufrecht, Arme über Kopfhöhe	8	19	33	60	100				
Sitzen											
7		aufrecht mit Rückenstütze ggf. leicht nach vorne oder nach hinten geneigt	0	0	0	1	2				
8		aufrecht ohne Rückenstütze (Einschränkungen zu Extrapunkten)	0	1	2	4	7				
9		nach vorn gebeugt	1	2	4	8	13				
10		aufrecht, Arme auf / über Schulterhöhe	4	10	16	30	50				
11		aufrecht, Arme über Kopfhöhe	6	14	25	45	75				
Knien oder Hocken											
12		aufrecht	5	9	15	27	45				
13		nach vorn gebeugt	6	14	25	45	75				
14		Arme auf / über Schulterhöhe	9	23	43	80	135				
Liegen & Klettern											
15		Liegen auf Rücken, Brust oder Seite, Arme über Kopf	9	21	37	68	113				
16		Klettern	10	33	66						

1) 0 ..... 1,5 ..... 2,5 3
nie (0%) 4s (6%) 10s (15%) >13s (20%)
0 ..... 1 ..... 3 5
leicht, <10° mittel, ~15° stark, ~25° extrem, >30°

2) 0 ..... 1 ..... 1,5 2
nie (0%) 4s (6%) 10s (15%) >13s (20%)
0 ..... 1 ..... 3 5
körpernah ~60% RW ~80% RW Arm gestreckt

Σ | Σ(max=15) | Σ(max=15) | Σ(max=10)

Σ(max=40)

Haltung = Σ Zeilen 1 - 16

Achtung: Max. Zeitdauer = Taktzeit bzw. Dauer der Tätigkeit oder 100% !

Achtung: Werte korrigieren, wenn Taktzeit ⬌ 60s

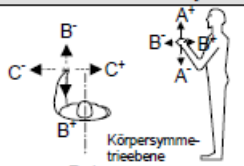
=

European Assembly Worksheet (V 1.3.2c de)

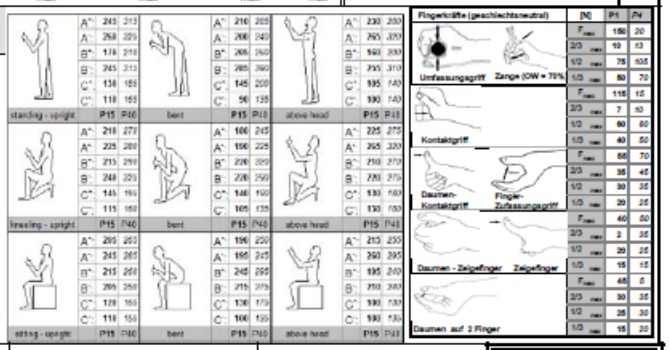
Aktionskräfte *(pro Minute / Schicht)* — Kräfte

17		Fingerkräfte (z. B. Clipse, Stecker)	0 ... 1 ... 1 ... 1,5 ... 2 ... 3,5 ... 7 [sec] 3 6 9 12 20 30 [%] 5 10 15 20 33 50 0 ... 1,5 ... 2 ... 2,5 ... 3 [n] 4 10 15 20 0 ... 7 ... 15 ... 25 ... 50 ~1/6 F_{max} ~1/3 F_{max} ~1/2 F_{max} ~2/3 F_{max} F_{max}	Dauer oder Anzahl x Kraftniveau Einzeleinstufungen: Σ
18		Arm-, Ganzkörperkräfte (keine Lasten)	0 ... 1 ... 1 ... 1,5 ... 2 ... 4 ... 8,5 [sec] 3 6 9 12 20 30 [%] 5 10 15 20 33 50 0 ... 1,5 ... 2 ... 3 ... 4,5 ... 6,5 ... 10 [n] 1-2 3 6 8 10 12 0 ... 6 ... 15 ... 25 ... 50 ~1/6 F_{max} ~1/3 F_{max} ~1/2 F_{max} ~2/3 F_{max} F_{max}	Dauer oder Anzahl x Kraftniveau Einzeleinstufungen: Σ

Kräfte F_{max} (P15) für Planungs- bzw. (P40) für geschlechtsneutrale Analysen.



Daten aus:
"Montagespezifischer Kraftatlas"
Wakula, Berg, Schaub, Glitsch, Ellegast 2008
(Veröffentlichung in Vorbereitung)
Daten können sich bis zum endgültigen Projektabschluss des Montagespezifischen Kraftatlas ändern!



Kräfte = Σ Zeilen 17 – 18 | **Achtung:** Max. Punktzahlen: Zeile 17 = 350 Pkt.; Zeile 18= 500 | **Achtung:** Werte korrigieren, wenn Taktzeit ⇒ 60s | =

Manuelles Handhaben von Lasten *(pro Schicht)* — Lasten

19 Lastgewichte [kg] für Umsetzen (Heben / Absetzen), Tragen und Halten sowie Ziehen und Schieben

Umsetzen, Tragen & Halten	Männer	3	10	15	20	25	30	35	40	> 40	
	Frauen	2	5	7	10	12	15	20	25	> 25	
Lastpunkte		1	1,5	2	3	4	5,5	7	8,5	25	
Ziehen und Schieben	Männer	Karren, Balancer,	< 50	75	100	150	200	250			
	Frauen	Manipulatoren	< 40	60	80	115	155	195			
	Männer	Transportwagen	< 50	75	100	150	250	350	550		
	Frauen	**ohne** Bockrollen	< 40	60	80	115	195	270	425		
	Männer	Transportwagen	< 50	75	150	250	350	500	600	800	1250
	Frauen	**mit** Bockrollen	< 40	60	115	195	270	385	460	615	960
Lastpunkte		Transportmittel	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	8

+ Körperhaltung, Position der Last (repräsentative Körperhaltung wählen)

- Oberkörper aufrecht und nicht verdreht
- Last am Körper

- geringes Rumpfneigen oder -drehen
- Last am Körper oder körpernah

- tiefes Beugen **oder** weites Vorneigen
- geringe Vorneigung **mit** gleichzeitigem Verdrehen des Oberkörpers
- Last körperfern oder über Schulterhöhe

- weites Vorneigen **und** Verdrehen
- Last körperfern
- eingeschränkte Haltungsstabilität stehen
- Hocken oder Knie

Haltungspunkte 1 | 2 | 4 | 8

(+) Ausführungsbedingungen (nur bei Ziehen und Schieben von Wagen) (0 ⇒ sehr geringer Rollwiderstand) (8 ⇒ sehr hoher Rollwiderstand)

• Wagen ziehen/schieben auf glattem Boden	• ...auf rauem Boden und über kleine Fugen / Kanten	...auf Riffelblech, unebenem Boden oder in/aus LKW	• Wagen müssen beim Anfahren losgerissen werden, stark beschädigter Fahrweg

Ausführungspunkte 0-2 | 3 | 5 | 6 | 8

x Häufigkeit der Lastenhandhabung [# / Schicht], **Haltedauer** [min] **oder Wegstrecke** [Meter / Schicht]]

# Umsetz- / Zieh-/Schiebevorgänge <5m	5	25	120	350	750	1000	1500	2000	2500	3000
Zeit (Haltedauer)	2,5 min	10 min	37 min	90 min	180 min	> 240 min				
Strecke (Tragen, Ziehen & Schieben > 5m)	300 m	650 m	2,5 km	6 km	12 km	> 16 km				
Häufigkeits-, Zeit- bzw. Wegpunkte	1	2	4	6	8	10	11	13	14	15

19a (Last + Haltung + (Ausführung)) x (# bzw. Dauer bzw. Distanz)

Umsetzen[1] (< 5 s)	(+) x =	Halten[1] (> 5 s)	(+) x =	Tragen[1] (> 5 m)	(+) x =	Ziehen & Schieben[1]	(+ +) x =

[1] Summe der *Häufigkeits-, Zeit- und Wegpunkte* für alle Tätigkeiten von Umsetzen, Halten, Tragen , Ziehen und Schieben maximal = 15 Pkt.

Lasten = Σ Zeile 19a = Umsetzen + Halten + Tragen + Ziehen/Schieben =

European Assembly Worksheet (V 1.3.2c de)

Belastung d. oberen Extremitäten bei (hoch)repetitiven Tätigkeiten — Obere Extremitäten

20 Anzahl der realen Aktionen [min^{-1}] bzw. prozentuale Anteile *{ zu betrachten ist die am meisten belastete Extremität }*

a Umfassungs- oder Kontaktgriff

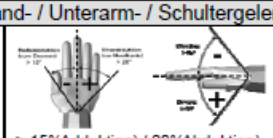
b Daumen-Kontaktgriff oder moderater Fingerzufassungsgriff

c starker Fingerzufassungsgriff (Daumen auf 1 oder 2 Finger)

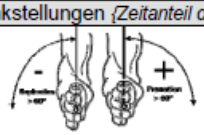
a [N]	Tätigkeit	stat. reale Aktionen (sec/min): sehr lang dauernde statische Aktionen; fast 75% (45)	lang dauernde statische Aktionen; fast 50% (30)	erheblicher Umfang statischer Aktionen; ~35% (20)	mittlerer Umfang statischer Aktionen; ~15% (10)	geringer Umfang statischer Aktionen; ~10% (5)	sehr geringer Umfang statischer Aktionen; < 5% (3)	dynam. reale Aktionen (n/min): Armbewegungen selten (2-5)	langsame Armbewegungen; regelmäßige kurze Unterbrechungen (10)	keine sonderlich schnellen Armbewegungen; kurze Unterbrechungen (15)	zeitlich schnelle Armbewegungen, aber kurze oder gelegentlich u. unregelm. Unterbrechungen (20)	schnelle Armbewegungen; gelegentliche und unregelmäßige kurze Pausen (25)	sehr schnelle Armbewegungen; Mängel an Unterbrechungen erschwert das Schritt halten (30)	sehr hohe Frequenzen; absolut keine Unterbrechungen (35)	höher (>35)	Greifbeding.: gute Greifbedingungen (0)	mittlere Greifbedingungen (2)	schlechte Greifbedingungen (4)	Berechnungen: (Kraft & Frequenz ÷ Dauer) + Griff	relativer Zeitanteil (%)	((Kraft & Frequenz ÷ Dauer) + Griff) x Anteil
0	sehr leichter Druck durch Finger oder Hand	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	7	abc	X	X			
5	leichter Druck durch Finger oder Hand	4	2	1	1	0	0	0	0	1	2	3	4	6	9	a b	b c	X			
20	Handhabung kleiner Lasten	7	5	3	2	1	1	0	1	2	3	4	6	8	12	a b	b	c			
35	Handhabung kleinerer Lasten oder kleiner manueller Werkzeuge	11	8	5	3	2	1	1	2	3	5	7	9	12	18	a	b	b			
90	Kraftausübung mit kleinen manuellen Werkzeugen	16	11	7	4	3	2	2	3	5	7	9	12	15	24	a	a b	b			
135	Kraftausübung beim Schneiden & Kraft für Greifen / Bewegen	21	14	10	6	4	3	4	5	6	8	11	14	20	32	a	a	b			
225	Kraftausübung mit großen manuellen Werkzeugen	28	18	12	8	5	4	5	6	7	9	12	16	26	40	a	a	b			
300	Aktionspunkte																				

Hand- / Unterarm- / Schultergelenkstellungen *{Zeitanteil der stärksten Belastung von Hand-, Unterarm- oder Schulter}*

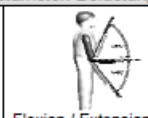
b



> 15°(Adduktion) / 20°(Abduktion)



Supination / Pronation > 60°



Flexion / Extension > 60°

Achtung: Punkte verdreifachen, wenn Aktionen auf oder über Schulterhöhe ohne Abstützung oder mit ungünstigen Körperhaltung erbracht werden müssen.

Hand- / Armhaltungspunkte	< 25%	25 – 50%	50 – 80%	> 80%
	0	1	3	4

zusätzliche Beeinträchtigungen {nur eine Antwort auswählen}

c

ungeeignete Handschuhe (unbequem, zu dick, zu groß etc.) müssen für über die Hälfte der Zeit verwendet werden	2
Arbeitsbewegungen implizieren Rückschläge (z. B. Hämmern, Schlagen auf harte Oberflächen mit einer Hacke etc.), mindestens 2 Mal pro Minute	
Arbeitsbewegungen implizieren Rückschläge (Hand wird als Werkzeug benutzt), mindestens 10 Mal pro Stunde	
Arbeit bei Kälte oder Kühlung/Kühlströmen (unter 0° C), über die Hälfte der Zeit	
Arbeit mit vibrierenden Werkzeugen, über ein Drittel der Zeit; bei stark vibrierenden Werkzeugen ist die **Punktezahl = 4**	
die verwendeten Werkzeuge verursachen Kompressionen der Haut (Rötungen, Schwielen, Blasen etc.)	
Präzisionsarbeit (Aufgaben mit einer räumlichen Genauigkeit von < 2-3 mm), über die Hälfte der Zeit oder mehr	
treten **mehrere** Einflussfaktoren gleichzeitig und über die gesamte Zeit hinweg auf, so ist die **Punktezahl = 3**	
Zusatzpunkte	

Dauer der repetitiven Bewegungen

d

Dauer [h / Schicht]	< 1	1,5	3	5	7	> 8	-
Zeitanteilspunkte	**1**	**1,5**	**3**	**5**	**7**	**10**	
Arbeitsorganisation	Arbeitsunterbrechungen jederzeit mögl. (Prozess wird nicht gestört)		Unterbrechungen möglich innerh. vorgeg. Rahmenbed.		Arbeitsunterbrechungen führen zu Prozess-Unterbrechungen		+
Organisationspunkte	**0**		**1**		**2**		
Erholpausen (> 8 min)	1	2 - 3	4 - 5	7	> 8		-
Erholungspunkte	**0**	**0,5**	**1**	**2**	**4**		
Dauerpunkte							=

Gesamtbewertung der Belastungen der oberen Extremitäten bei repetitiven Tätigkeiten

20	(Fingerpunkte	+	Hand- / Arm-haltungspunkte	+	Zusatzpunkte)	x	Dauerpunkte	=	Obere Extrem.
	(a	+	b	+	c)	x	d	=	

Anlage 5: Fragebogen zur Evaluationsstudie

Evaluationsstudie ema

Der Editor menschlicher Arbeit (ema) ist ein Werkzeug zur Planung und Visualisierung manueller Arbeitstätigkeiten, das mit Hilfe eines digitalen Menschmodells 3D-Simulationen vollständiger Arbeitsabläufe erzeugt. Grundlage dafür bilden Bewegungsalgorithmen, die mittels Motion Capturing aus Realbewegungen abgeleitet wurden. Zum Funktionsumfang gehört auch eine semiautomatische Ganzkörper-Ergonomiebewertung auf Basis des Ergonomic Assessment Worksheet (EAWS). **Mit Hilfe dieser Studie soll sichergestellt werden, dass die Bewegungssimulationen und -auswertungen valide Vorhersagen zur ergonomischen Belastungssituation ermöglichen.**

Dazu sollen im Folgenden zwölf Beispiel-Simulationen beurteilt werden.
Zunächst sind **fünf Fragen zur humanmotorischen Richtigkeit** der Bewegungen zu beantworten. Dabei soll als Maßstab die Arbeits- und Bewegungsweise eines durchschnittlich geübten Mitarbeiters in der Produktion gelten. Besonderheiten, die in der jeweiligen Simulation beobachtet werden, können in den dafür vorgesehenen Freitextfeldern ergänzt werden.

Anschließend soll eine **Stift-Papier-Bewertung mit EAWS** erstellt werden. Hierbei sind die neben den Gesamtpunkten auch die Einzelwerte innerhalb der Module von Bedeutung.

Vielen Dank für die Unterstützung.

Beispiel 01: „Reserverad“

A Beurteilung der Humanmotorik

1. Biomechanik: Die Körperhaltungen erscheinen natürlich
   (Abweichungen wären bspw. übertriebene Beugungen oder Verdrehungen.)
   ☐ trifft voll zu ☐ trifft weitgehend zu ☐ trifft kaum zu ☐ trifft nicht zu

   Erkannte Abweichungen bitte kurz erläutern.

2. Die Bewegungsmuster wirken praxisnah (betrifft die Bewegungsbahnen, Flüssigkeit und Geschwindigkeit der Bewegungen).
   ☐ trifft voll zu ☐ trifft weitgehend zu ☐ trifft kaum zu ☐ trifft nicht zu

   Erkannte Abweichungen bitte kurz erläutern.

3. Die Arbeitsmethode wirkt praxisnah (betrifft den gewählten Arbeitsablauf und die Reihenfolge).
   ☐ trifft voll zu ☐ trifft weitgehend zu ☐ trifft kaum zu ☐ trifft nicht zu

   Erkannte Abweichungen bitte kurz erläutern.

4. Die Simulation insgesamt ist zur Plausibilisierung geplanter Arbeitsabläufe geeignet.
   ☐ trifft voll zu ☐ trifft weitgehend zu ☐ trifft kaum zu ☐ trifft nicht zu

   Erkannte Abweichungen bitte kurz erläutern.

5. Die Simulation insgesamt ist zur präventiven Ergonomiebewertung geeignet.
   ☐ trifft voll zu ☐ trifft weitgehend zu ☐ trifft kaum zu ☐ trifft nicht zu

   Erkannte Abweichungen bitte kurz erläutern.

B EAWS-Bewertung

Gesamtergebnis der Analyse

Gesamt Körper	=	Haltung	+	Kräfte	+	manuelle Lasten-handhabun	+	Extra
	=		+		+		+	

Körperstellung sowie Rumpf- und Armhaltungen

			Dauer [s]	Anteil [%]	Bewer-tung	Rumpf- drehung	Rumpf- neigung	Reich-weite
Stehen								
1		aufrecht; Stehen und Gehen						
2		Stehen						
3		nach vorn gebeugt (20-60°)						
		…mit Abstützung						
4		starkt gebeugt (>60°)						
		…mit Abstützung						
5		aufrecht; Arme über Schulterhöhe						
6		aufrecht; Arme über Kopfhöhe						
Sitzen								
7		aufrecht mit Rückenstütze						
8		aufrecht ohne Rückenstütze						
9		nach vorn gebeugt						
10		aufrecht; Arme über Schulterhöhe						
11		aufrecht; Arme über Kopfhöhe						
Knien oder Hocken								
12		aufrecht						
13		nach vorn gebeugt						
14		Arme über Schulterhöhe						
Liegen oder Klettern								
15		Liegen; Arme über Köpf						
16		Klettern						
Summe Zeilen 1-16: Haltung, Rumpfdrehung und -neigung, Reichweite								
Haltung = Summe Zeilen 1 - 16								

Aktionskräfte				
17		Fingerkräfte (z.B. Clipse, Stecker)	Dauer oder Anzahl x Kraftniveau	
18		Arm-, Ganzkörperkräfte (keine Lasten)	Dauer oder Anzahl x Kraftniveau	
Kräfte = Summe Zeilen 17 - 18				

Manuelles Handhaben von Lasten				
19		Umsetzen	(Last + Haltung) x Anzahl	
		Halten	(Last + Haltung) x Dauer	
		Tragen	(Last + Haltung) x Distanz	
		Ziehen und Schieben	(Last + Haltung + Ausführung) x Distanz	
Lasten = Summe Zeile 19				

Extra Punkte			
0a	Beeinträchtigung durch Arbeit an sich bewegenden Objekten		
0b	Zugänglichkeit (z.B. Motor- oder Passagierbereich)		
0c	Schwingungen, Impulse, Rückschlagkräfte	Anzahl x Intensität	
0d	Gelenkstellungen (insb. Handhelenk)	Dauer ODER Anzahl x Intensität	
0e	Andere körperliche Belastungen (separat anzugeben)		
Extra = Summe Zeilen 0a - 0e			

Lebenslauf

Persönliche Daten

Geburtsdatum	11.12.1982
Geburtsort	Leipzig

Berufspraxis

Seit 05/2011	Industrial Engineer bei Volkswagen Sachsen GmbH, Motorenwerk Chemnitz
07/2008 – 04/2011	Berater Produkt- und Prozessmanagement bei imk automotive GmbH in Chemnitz

Ausbildung

Seit 04/2009	Doktorand im Rahmen des Verbundprojektes „System zur Bewegungssynthese für digitale Menschmodelle (eMAN)“
10/2002 – 09/2008	Studium Wirtschaftsingenieurwesen an der Technischen Universität Chemnitz
09/2001 – 06/2002	Grundwehrdienst in Braunschweig und Wesendorf
06/2001	Abitur am Greifenstein-Gymnasium Thum

Publikationen

Fritzsche, L., & Jendrusch, R. (2009). Prospektive Arbeitsgestaltung mit digitalen Menschmodellen – Validität der Ergonomiebewertung von simulierten Arbeitsabläufen in der Automobilmontage. In *Arbeit, Beschäftigungsfähigkeit und Produktivität im 21. Jahrhundert. 55. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 583-587). Dortmund: GfA-Press.

Jendrusch, R., & Bauer, S. (2010). Der virtuelle Facharbeiter nimmt seine Arbeit auf. *Tagungsband Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme* (S. 200-206). Magdeburg: Fraunhofer Verlag.

Jacob, H., Toledo Muñoz, B., Busche, C., & Jendrusch, R. (2010). Durchgängige Ergonomieabsicherung im Produktentstehungsprozess bei Volkswagen. In *Mensch- und prozessorientierte Arbeitsgestaltung im Fahrzeugbau: Herbstkonferenz 2010 der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 63-68). Dortmund: GfA-Press.

Jendrusch, R., Pirger, A., & Fritzsche, L. (2011). Semiautomatische Ergonomiebewertung mit dem Editor menschlicher Arbeit (ema). In *Mensch, Technik, Organisation - Vernetzung im Produktentstehungs- und -herstellungsprozess. 57. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 641-644). Dortmund: GfA-Press.

Leidholdt, W., Jendrusch, R., & Fritzsche, L. (2011). Der Humanmotorik auf der Spur - Algorithmische Bewegungsgenerierung Digitaler Menschmodelle. In *Mensch, Technik, Organisation - Vernetzung im Produktentstehungs- und -herstellungsprozess. 57. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 607-610). Dortmund: GfA-Press.

Jendrusch, R., Leidholdt, W., Bauer, S., Hermsdorf, H., Hofmann, N., Keil, A., & Spanner-Ulmer, B. (2011). Algorithmische Bewegungsgenerierung und semiautomatische Ergonomiebewertung für digitale Menschmodelle. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 03/2011*, S. 259-271.

Fritzsche, L., Jendrusch, R., Leidholdt, W., Bauer, S., Jäckel, T., & Pirger, A. (2011). Introducing ema (Editor for Manual Work Activities) – A New Tool for Enhancing Accuracy and Efficiency of Human Simulations in Digital Production Planning. In V. Duffy, *Digital Human Modeling, HCII 2011, LNCS 6777* (S. 272–281). Berlin: Springer.

Jendrusch, R. (2012). Einsatz digitaler Menschmodelle im Produkt-Entstehungs- und Herstellungsprozess. In *Gestaltung nachhaltiger Arbeitssystme. 58. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 169-172). Dortmund: GfA-Press.

Arnold, R., & Schönherr, R. (2012). Ganzheitliches Beschreibungsmodell der Digitalen Fabrik im Anlauf als Schnittstelle zwischen Planung und Serie. In E. Müller, & A. Bullinger-Hoffmann, *VPP2012 Vernetzt planen und produzieren & Symposium Wissenschaft und Praxis. Intelligent vernetzte Arbeits- und Fabriksysteme* (S. 73-82). Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme.

Schönherr, R., Fritzsche, L., & Schmickartz, S. (2013). Praxis digitaler Arbeitsplanung – Validierungsstudie zum Einsatz des Editors menschlicher Arbeit (ema). *In Chancen durch Arbeits-, Produkt- und Systemgestaltung - Zukunftsfähigkeit für Produktions- und Dienstleistungsunternehmen. 59. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (S. 339-342).* Dortmund: GfA-Press.